

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO



INSTITUTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EM FÍSICA

PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA

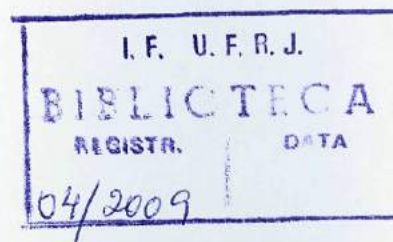
Desvendando a lei de Ohm: buscando respostas na história

Danielli Meira Ribeiro da Silva

Orientador: Prof. Vitorvani Soares

2009/2

04/2009



Desvendando a lei de Ohm: buscando respostas na história

Ficha catalográfica

Silva, Danielli Meira Ribeiro da

Desvendando a lei de Ohm: Buscando respostas na História, Danielli Meira Ribeiro da Silva — Rio de Janeiro: Projeto de Instrumentação para o Ensino de Física — Instituto de Física/UFRJ, 2009.

1. Eletricidade 2. História da física. 3. Lei de Ohm.
4. Ciência — Ensino Médio. 5. Física clássica.

I. Título

Agradeço...

- ♥ À Deus, por ter me concedido o maior de todos os dons: A vida. E assim poder contemplar toda a beleza da natureza, Sua grande obra, e que a cada dia acreditamos ser possível desvendar;
- ♥ À minha mãe Eliete Gonçalves Meira, mulher guerreira e compreensiva, que esteve ao meu lado em TODOS os momentos da minha vida, verdadeiro presente de Deus para mim;
- ♥ Ao meu noivo e companheiro Roberto Queiroz, por seu amor, carinho, dedicação, incentivo, compreensão e pelo empréstimo da sua casa para que eu pudesse desenvolver este trabalho com mais tranquilidade;
- ♥ Ao meu grande amigo e padrinho Vitor Ribeiro de Souza, pela paciência e sábias palavras dirigidas a mim nos momentos difíceis, pelas partilhas e pela parceria fiel neste e em outros trabalhos;
- ♥ À minha amiga e irmã Carolina Boa Nova, pelo companheirismo, acolhimento e carinho dedicados a mim, durante os nossos anos de graduação;
- ♥ Ao meu querido amigo, orientador acadêmico e de monografia, Professor Vitorvani Soares, pelas longas conversas das reuniões de orientação e, sobretudo pela paciência frente às minhas dúvidas e incertezas ao longo da minha graduação.
- ♥ À Banca examinadora, pela disponibilidade para a leitura e avaliação deste trabalho;
- ♥ Ao amigo André Carvalho pela disponibilidade e cuidado ao refazer algumas das figuras contidas neste trabalho.
- ♥ Aos demais parentes e amigos que, mesmo de longe, contribuíram com orações, vibrações positivas, telefonemas ou mensagens de incentivo a fim de que eu pudesse finalizar com êxito mais esta etapa da minha vida.

Muito obrigada!

Dedico esta monografia aos meus colegas professores-educadores que, assim como eu, acreditam ser possível construir um mundo melhor através da educação e do amor.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”—*Albert Einstein*.

“Para escalar o posto mais alto é sempre preciso muito sacrifício, abnegação, força de vontade, dedicação, honestidade, pensamento positivo e principalmente ter fé em nós mesmos. Se fizer a sua parte, Deus sempre estará do seu lado.”—*Eliete Meira*.

RESUMO

Neste trabalho, resgatamos uma história esquecida, ou muitas vezes desconhecida por grande parte dos professores de física do Ensino Médio, a história da lei de Ohm. A nossa motivação surgiu quando refletimos sobre os métodos experimentais de ensino deste tema, onde propõe-se um circuito elétrico com resistores e pede-se aos alunos que façam medições de tensão e corrente, a fim de encontrarem uma relação entre essas grandezas e, assim, para sistemas ôhmicos deduzirem a famosa relação $I = V / R$. Outra observação que fizemos durante nossa reflexão, trata da forma como este tema é abordado em sala de aula, dado o grau de simplificação das equações, do fenômeno em si e das relações entre as grandezas envolvidas. Desta forma, verificamos que existe uma falta de preocupação com o contexto histórico inerente ao desenvolvimento deste tema, o que ajuda a transformar o conceito, de grande relevância, num amontoado de fórmulas que muitas vezes é visto pelos alunos como sem significado.

Nesta perspectiva, nos perguntamos então, como teria sido o processo de construção desse conhecimento, desde a motivação experimental até a formulação da equação. Acreditamos que ao respondermos esta pergunta, teríamos então as ferramentas necessárias para conduzir nossas aulas. Proporcionaríamos aos alunos uma reflexão acerca desse processo de construção, levando em conta as motivações pessoais dos cientistas envolvidos, que certamente estiveram — como hoje também estamos — inseridos em um contexto econômico e político que contribuiu para a condução de seus trabalhos. Buscamos essa resposta na história biográfica de Georg Simon Ohm, e ainda nas de alguns cientistas seus contemporâneos, que participaram direta e indiretamente do processo de formulação desta “lei” que hoje leva seu nome. Está contemplada neste trabalho a descrição dos experimentos e observação da interação dos fenômenos térmicos, magnéticos e elétricos em alguns materiais condutores, realizados por Ohm. A partir dos resultados obtidos durante as experiências de Ohm, apresentamos os seus resultados juntamente com nossa análise gráfica buscando identificar as relações entre as grandezas propostas por Ohm.

ÍNDICE

RESUMO.....	II
1. INTRODUÇÃO	15
2. CONSIDERAÇÕES PEDAGÓGICAS	17
A HISTÓRIA NO ENSINO DE FÍSICA	17
JUSTIFICATIVAS PARA A APRESENTAÇÃO DESTE TRABALHO.	19
3. AS ORIGENS DA DESCOBERTA.....	21
QUEM FOI GEORGE SIMON OHM?.....	21
AS INVESTIGAÇÕES SOBRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	24
A ECONOMIA E O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO ENTRE OS SÉCULOS XVII E XIX.	26
AS DESCOBERTAS ELETROMAGNÉTICAS E O CONTEXTO ECONÔMICO DO SÉCULO XX.....	28
4. AS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS DE OHM.....	33
AS CONTRIBUIÇÕES DOS CONTEMPORÂNEOS DE OHM.....	33
<i>Coulomb e sua balança de torção.</i>	33
<i>Oersted e o início do eletromagnetismo.</i>	35
<i>Alessandro Volta e a sua pilha.</i>	37
<i>A termoeletricidade de Seebeck.</i>	39
AS INVESTIGAÇÕES PRELIMINARES DE OHM.	40
5. O PRINCIPAL TRABALHO DE OHM	49
DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO PRINCIPAL	49
O PROCEDIMENTO E OS RESULTADOS DE OHM.....	56
6. ANALISANDO OS RESULTADOS DE OHM.....	61
INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE OHM ATRAVÉS DE GRÁFICOS.	61
DA EXPERIÊNCIA À FORMULAÇÃO TEÓRICA DE OHM.....	67
A LEI DE OHM COMO A CONHECEMOS HOJE.....	70
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
REFERÊNCIAS	75

1. INTRODUÇÃO

A ciência física vista como um processo contínuo e progressivo de construção do conhecimento a respeito do mundo que nos cerca vem, ao longo dos últimos séculos, se desenvolvendo de maneira acelerada. Ao se estudar um pouco mais da sua história, percebemos que, na maioria das vezes, o que ensinamos aos nossos alunos do Ensino Médio é simplesmente uma sintetização dos conceitos, e que muitas vezes omitimos – por diversos motivos – os processos de construção do pensamento científico.

A Lei de Ohm no Ensino Médio é tratada, na maioria dos livros didáticos [1], a partir da conceituação de resistência elétrica e definindo-se, em seguida, sua relação de causa e efeito, $R = V/I$ ou $V = RI$. Dizemos então que a diferença de potencial elétrico V varia linearmente num circuito elétrico de acordo com a corrente elétrica I que o percorre. Esta simplificação, apesar de não estar totalmente correta é válida para fins didáticos. Porém a relação de causa e efeito está invertida. A história nos conta que, ao realizar sua experimentação, Ohm deduziu, escrevendo em nossos termos, a relação $I = V/R$, isto é, ele variou a resistência elétrica R do circuito, obtendo diferentes valores de corrente I e mantendo a diferença de potencial constante. Uma interessante observação é a de que nos livros didáticos consultados, apenas o Física Eletricidade, do autor Djalma Paraná, enfatiza que a equação do gerador $I = V/(r + R)$, seria a equação da lei de Ohm generalizada [1].

Por outro lado, alguns professores utilizam a montagem e medição de circuitos elétricos para verificação dessa lei. Atualmente, esse método tem funcionado. Entretanto, para realizá-lo, nós aplicamos e monitoramos diferentes valores de tensão em um resistor — que padronizamos como ôhmico — e medimos a corrente que passa neste circuito. Ora, mas para monitorar essa corrente e tensão utilizamos aparelhos, voltímetros e amperímetros, que funcionam baseados na lei de Ohm. Deste modo, não haveria então certa incoerência em tal prática?

Os professores atentos à contextualização histórica de seus conteúdos, certamente não teriam dificuldade em realizar a experimentação contemporânea e

verificar a lei, levando em conta tais aspectos. Infelizmente isto não acontece na maioria das escolas, muitas vezes pela necessidade de se trabalhar um extenso conteúdo num escasso intervalo de tempo. Desta forma o professor não consegue aprofundar tais questões pertinentes à história das descobertas científicas, no nosso caso, da lei de Ohm.

Ao relatarmos o experimento e os resultados de Ohm desvendamos qual teria sido o caminho percorrido por ele para chegar à equação que conhecemos hoje e, para tanto, recorreremos às suas bases teóricas e experimentais. Ohm dedicou grande parte do seu trabalho à investigação das propriedades dos diferentes tipos de metais quando ligados à pilha de Volta.

Ao fazermos um aprofundamento nesta busca encontramos a contribuição de nomes importantes na história da eletricidade e do magnetismo tais como Humphry Davy, Coulomb, Volta, Fourier, Oersted e Seebeck. Além disso, trazemos um breve resumo do cenário econômico e científico entre os séculos XVII e XIX, que nos ajuda a compreender quais os interesses econômicos vinculados ao desenvolvimento científico-tecnológico, que poderiam servir — direta ou indiretamente — de motivadores ao trabalho do cientista Georg Simon Ohm.

Como resultado dessa pesquisa, apresentamos o experimento de Ohm e seus resultados experimentais. De posse dos dados do experimento de Ohm, na qual ele estabelece a sua “lei”, fazemos uma interpretação gráfica cujo objetivo é determinar a relação algébrica mais simples possível entre as variáveis estudadas por Ohm. A partir deste resultado, entenderemos um pouco mais da proposta do posterior trabalho teórico de Ohm, onde ele apresenta seus resultados com auxílio da teoria do calor de Fourier [2,3].

Ensinar a lei de Ohm, fazendo sua contextualização sócio-cultural, é o que sugere os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio como uma das competências gerais a serem trabalhadas no ensino da física, que contém como um de seus itens, a Ciência e Tecnologia na História [4]. Tal contextualização busca a compreensão do conhecimento científico e tecnológico como resultado de uma construção humana, inserido em um processo histórico e social. Este trabalho destina-se então, do ponto de vista pedagógico, a ser material de apoio aos professores de física em suas aulas nas turmas do Ensino Médio.

2. CONSIDERAÇÕES PEDAGÓGICAS

A história no ensino de física

Atualmente, existe uma grande discussão entre os acadêmicos sobre quais seriam os enfoques pedagógicos que colaborariam para um ensino de física mais estimulante e eficiente, em termos de aprendizagem. Dentre as opções mais discutidas, contemplamos neste trabalho o enfoque da História da Ciência, em particular da física, por considerar sua contribuição um auxiliar para a compreensão dos conceitos e dos experimentos. Acreditamos que a História da Ciência precisa valorizar o contexto social, cultural, político e econômico, tendo em vista que cada novo avanço científico se caracteriza pelo modelo de sociedade existente na respectiva época. Desta forma, não devemos restringir a descoberta científica à história biográfica do cientista, como fazem alguns livros didáticos [1].

A forma como utilizamos (ou não) a história da física nas nossas práticas didáticas está sujeita a alguns questionamentos importantes. Alguns autores defendem que a “exposição à história poderia abalar ou enfraquecer as convicções do estudante sobre o paradigma vigente, sendo, portanto, danosa à sua formação” [5]. De acordo com essa afirmativa, os estudantes não precisariam passar pelas incertezas e dúvidas que os cientistas viveram para compreender o produto final científico aos quais são expostos pelas estratégias pedagógicas que não fazem uso da História da Ciência.

Entretanto, acreditamos que trabalhar didaticamente com a história da construção de um conceito em determinado tema em física seja possível, desde que nós, professores, tenhamos a adequada formação, com acesso à história das grandes descobertas. Esta história deveria estar inserida no respectivo contexto social e econômico, a fim de facilitar a compreensão de suas inter-relações. A formação, para ser consistente e produtiva, não deveria se restringir à disciplina curricular dos cursos de Licenciatura em Física. Ela deveria fazer parte de uma cultura onde os licenciandos por livre iniciativa — ou mesmo incentivados por seus professores durante a graduação — pesquisariam e até produziram materiais relacionados a esse tema. Desta forma, poderíamos cada um no seu contexto particular de sala de aula,

incluir, com o devido equilíbrio, reflexões acerca das descobertas do passado e suas implicações com o presente, principalmente no âmbito científico-tecnológico.

Obviamente não pretendemos afirmar que todo o conteúdo de física deva ser contextualizado historicamente como premissa para o sucesso da aprendizagem desta ciência. Até porque nossa estrutura curricular não permitiria tal proeza. Apenas acreditamos que a História da Ciência pode, entre outros fatores e de acordo com Peduzzi: [5, pág. 157]

"Propiciar o aprendizado significativo de equações (que estabelecem relações entre conceitos, ou que traduzem leis e princípios) que o utilitarismo do ensino tradicional acaba transformando em meras expressões matemáticas que servem à resolução de problemas;

Incrementar a cultura geral do aluno, admitindo-se, neste caso, que há um valor intrínseco em se compreender certos episódios fundamentais que ocorreram na história do pensamento científico (como a revolução científica dos séculos XVI e XVII, por exemplo);

Desmistificar o método científico, dando ao aluno os subsídios necessários para que ele tenha um melhor entendimento do trabalho do cientista;

Mostrar como o pensamento científico se modifica com o tempo, evidenciando que as teorias científicas não são 'definitivas e irrevogáveis', mas objeto de constante revisão;

Contribuir para um melhor entendimento das relações da ciência com a tecnologia, a cultura e a sociedade;

Tornar as aulas de física mais desafiadoras e reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico."

É evidente que nem sempre estes fatores aparecerão simultaneamente durante o exercício da prática didática utilizando o enfoque histórico. Entretanto, aliando a pesquisa, o material histórico adequado e um bom planejamento de aula, poderíamos referendar alguns destes fatores e ainda preencher de alguma forma o vazio deixado pela maioria dos livros-texto de física do Ensino Médio, que, em geral, “negligenciam o valor didático História da Ciência” [5].

A promoção dessas competências que objetivam a compreensão do desenvolvimento do conhecimento científico e o tecnológico ao longo da história corrobora o que diz os Parâmetros Curriculares Nacionais, no âmbito das competências e habilidades desejadas no ensino da física em nível médio. No que diz respeito ao enfoque da ciência e tecnologia na história e a sua relação com o presente trabalho, acreditamos que as competências a serem desenvolvidas nos alunos contemplem a compreensão da “construção do conhecimento físico como um processo histórico, em estreita relação com as condições sociais, políticas e econômicas de uma determinada época” [4].

Justificativas para a apresentação deste trabalho.

A História da Ciência e, em particular a história da física é repleta de surpresas e curiosidades. Ao ler dois artigos que tratavam da história da lei de Ohm [6,7], duas perguntas nos motivaram a fazer a pesquisa que resultou neste trabalho.

Uma das perguntas estava relacionada à forma como a lei de Ohm é apresentada aos alunos do Ensino Médio. As práticas didáticas mais utilizadas neste caso são: a discussão do conceito de resistência elétrica associado à clássica equação apresentada nas diferentes formas: $V = R.I$, $R = V/I$ e $I = V/R$. A sequência da maioria dos livros didáticos sugere que o estudo do circuito elétrico e de seus componentes seja iniciado pelo estudo das características da resistência elétrica e finalizado com o estudo do gerador de força eletromotriz, isto é, começando da parte até atingir o todo [1]. Ao pesquisarmos a história da descoberta, concluímos que esta não seria a única maneira de abordar o tema. Uma discussão sobre a forma de apresentação da lei de Ohm poderia gerar outros trabalhos acadêmicos e, apesar de ter se tornado uma questão motivadora para nosso trabalho, não será sobre ela que nos debruçaremos a seguir.

Outra pergunta que nos fizemos foi em relação a qual teria sido a motivação, o contexto social e econômico, o tipo de experimento e análise de dados utilizados por Ohm, no desenvolvimento de sua lei. Não encontramos, ao longo da nossa pesquisa, material único que satisfizesse nossas expectativas e curiosidades acerca da história de Ohm e de sua significativa contribuição a ciência física.

Neste contexto, desenvolvemos um trabalho que resgata a história da descoberta da lei de Ohm, de forma contextualizada e sistematizada, visando esclarecer aspectos importantes na construção deste conceito físico. Este trabalho foi concebido para ser fonte de pesquisa para atuais e futuros professores de física. Na medida em que se possui material de pesquisa histórica e iniciativa didático-pedagógica, pode-se iniciar um trabalho de formação científica ao nível de Ensino Médio que contemple o *"conhecimento científico e o tecnológico como resultados de uma construção humana, inseridos em um processo histórico e social"*, como prevê os Parâmetros Curriculares Nacionais.

Este trabalho não tem a pretensão de ser conclusivo. Ao contrário, apesar de ser um trabalho essencialmente focado na história da lei de Ohm, pode-se sim, a partir dele, se desenvolver outras questões pertinentes ao contexto educacional, entre elas, podemos citar a ampla discussão que pode ser feita a partir do detalhamento da teoria apresentada por Ohm, ou mesmo a possibilidade de se reproduzir o experimento (réplica) de Ohm. Até mesmo a partir da análise gráfica realizada a partir dos dados experimentais de Ohm, pode-se desenvolver um trabalho pedagógico sobre os resultados apresentados.

Os professores terão neste trabalho a possibilidade de conhecer um pouco mais sobre a história da eletricidade e de desenvolver estratégias didáticas que sejam adequadas ao cronograma, currículo e a realidade social e econômica dos seus alunos. Essa iniciativa proporcionará aos seus, reconhecer a Física como *"um processo cuja construção ocorreu ao longo da história da humanidade impregnado de contribuições culturais, econômicas e sociais, que vem resultando no desenvolvimento de diferentes tecnologias e, por sua vez, por elas são impulsionados"* [5].

3. AS ORIGENS DA DESCOBERTA

Quem foi Georg Simon Ohm?

Georg Simon Ohm foi um cientista alemão que nasceu no dia 16 de março de 1789, em Erlangen, Baviera [3]. Ele era filho do mestre serralheiro Johann Wolfgang Ohm e Maria Elizabeth Beck. Dos sete filhos deste casal, apenas três sobreviveram à infância: Martin, o matemático, Elizabeth Barbara e Ohm. O pai de Ohm, que era um autodidata esforçado, contribuiu fortemente para a educação de Ohm e de seu irmão Martin durante a escola primária, através de uma sólida educação em matemática, física e química. As aptidões matemáticas de Ohm e Martin foram reconhecidas em 1804, através de um incomum elogio feito pelo Professor Karl Christian Langsdorff da Universidade de Erlangen; depois de examiná-los durante cinco horas ele ficou espantado com suas habilidades e disse que um dia eles estariam em pé de igualdade com os irmãos Bernoulli!

Ohm entrou na Universidade de Erlangen em maio de 1805, onde estudou por três semestres. Tendo em vista o desagrado manifestado pelo pai, Johann, ao perceber que seu filho se envolvia com atividades de dança, jogos e patinação no gelo, Ohm se exilou para uma região rural da Suíça, mas continuou a estudar matemática, física e filosofia. Por conta de algumas dificuldades financeiras, trabalhou durante esse exílio como professor de matemática, mesmo considerando essa atividade por vezes maçante. Por volta de 1811, Ohm voltou a Erlangen onde concluiu seu doutorado em filosofia, apesar de não se ter notícia de nenhuma tese. Neste período ele se interessou pela mecânica e particularmente pela óptica.

Destacamos uma curiosidade interessante. No ano crítico de 1813, o espírito alemão estava se revoltando contra Napoleão que então fazia campanha na Europa e já havia o temor de que algum conflito interno pudesse surgir entre a Prússia e a Baviera. Embora mais de mil tropas fossem formadas em Erlangen e com Ohm em idade militar, por alguma razão desconhecida ele não foi chamado a este serviço. Acredita-se que nesse período ele tenha escrito seu primeiro trabalho, o texto de geometria elementar *Grundlinien zu einer zweckmässigen Behandlung der Geometrie als höheren bildungsmittels na vorbereitenden Lehranstalten* [Fundamentos para um

tratamento adequado da geometria como recurso de formação para instituições preparatórias de ensino], publicado em 1817, em Erlangen. Este trabalho traduzia a sua idéia sobre o significado da matemática na educação formal. Para Ohm, a matemática deveria ser aprendida de forma natural, como livre produto da própria mente e não como algo acabado e imposto por fora. Essa sua visão sobre a construção do conhecimento matemático o conduziu no desenvolvimento dos seus trabalhos posteriores. Ele estava convencido de que o sentido de sua vida estava em se dedicar ao puro conhecimento, e acreditava que isto traria a autoconfiança necessária e o auto-respeito capaz de resistir às dificuldades externas que porventura pudessem surgir ao longo da vida. Percebemos claramente nesses sentimentos, o reflexo da sua educação primária e também dos anos de isolamento vividos por ele.

Ohm almejou a cátedra (uma indicação ao posto de professor universitário) durante toda a sua vida. Em 1817, lecionou física e matemática no ginásio jesuíta de Colônia, onde o ambiente da escola era considerado estimulante para o ensino e a aprendizagem, seguindo os ideais da formação científica. Essa atmosfera e a exigência de que se ensinasse física em laboratórios bem equipados, chamou a atenção de Ohm que se viu, pela primeira vez, interessado pela ciência física. Ohm estudou os clássicos franceses: Lagrange, Legendre, Laplace, Biot e Poisson, além de Fourier e Fresnel. Após a descoberta da relação experimental entre a eletricidade e o magnetismo em 1820, por Oersted, Ohm iniciou seus trabalhos nesta área. Somente a partir de 1825 suas pesquisas chegaram ao nível de publicação. Em 1826, Ohm obteve uma licença de um ano, recebendo meio salário, a fim de continuar seus trabalhos. Mas ao final da licença, em setembro de 1827, apesar da publicação da sua grande obra "*Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet*" [O circuito galvânico, matematicamente elaborado], ele não conseguiu a tão desejada indicação universitária.

Ohm ainda trabalhou como professor na Escola Geral de Guerra em Berlin (1828), na Escola Reunida de Guerra e Engenharia (1832), e conseguiu o posto de professor de física na Escola Politécnica de Nuremberg (1833). Somente a partir de 1839, ele começou a receber o merecido reconhecimento pelo seu trabalho ao se tornar membro correspondente das Academias de Berlim e, em 1841, de Turim. Recebeu em 1841 a medalha Copley da Royal Society de Londres e, em seguida, tornou-se membro desta instituição.

O período da vida de Ohm na qual vamos nos concentrar será a década de vinte do século XIX, quando ele, após alguns percalços, obteve recursos financeiros para

conduzir suas pesquisas, sozinho e publicar sua grande obra, em 1827. Este trabalho traz uma originalidade conceitual importante, pois Ohm conseguiu demonstrar uma relação entre o que ele chamava de fluido elétrico e a força (eletroscópica) capaz de deslocar uma agulha magnética. Tais grandezas são identificadas atualmente como corrente elétrica e tensão elétrica, e justamente a relação entre elas é o conceito que trazemos para sala de aula nos dias atuais e está disponível nos circuitos dos aparelhos que usamos para medir a tensão e corrente nos experimentos realizados em laboratório para a verificação da lei de Ohm. Entretanto, veremos que Ohm utilizou um outro aparato inspirado pelas experiências de Coulomb, Volta, Seebeck e Oersted, e a motivação da pesquisa em eletricidade era não somente científica, mas também econômica e política, pois a partir do descobrimento da pilha de Volta em 1800, não só Ohm, mas vários outros cientistas e organizações com fins lucrativos passaram a pesquisar as propriedades químicas e físicas dessa tal “força eletroscópica” aplicada principalmente aos metais. O interesse das “organizações” era a viabilidade da aplicação dessa tecnologia em larga escala.



Figura 1. Georg Simon Ohm (Deutsches Museum, Munich) [7].

Assim que o trabalho de Ohm foi publicado em 1827, ele não foi bem aceito pela comunidade científica alemã logo de imediato. Os cientistas alemães, nessa época, eram representantes de uma abordagem mais conceitual e menos matemática

da física. Entretanto, já no início da década de 1830, alguns jovens cientistas começaram a usá-lo como referência em seus trabalhos: Gustav Theodor Fechner deu lugar de destaque ao trabalho de Ohm em seu *“Manual do galvanismo e da eletroquímica”*, publicado em 1829. Ele a submeteu a um rigoroso teste experimental, que a confirmou no trabalho publicado em 1831, *“Determinações da massa do circuito galvânico”*; Heinrich Friedrich Emil Lenz utilizou-a em seu primeiro artigo sobre indução eletromagnética, *“Sobre as leis de como o imã atua sobre uma espiral ao ser rapidamente aproximado ou afastado dela, e sobre a construção mais favorável das espirais para fins eletromagnéticos”*, publicado em 1832; Wilhelm Eduard Weber e Karl Friedrich Gauss utilizaram-na em 1832 e 1833 na conexão com as investigações sobre o magnetismo terrestre e a construção de instrumentos de precisão; e Moritz Hermann Jacobi utilizou-a em sua primeira publicação *“Dissertação sobre a aplicação do eletromagnetismo ao movimento das máquinas”*, publicado em 1835 [3].

É fato, e já comentamos aqui, que os resultados de Ohm só foram considerados legítimos e reconhecidos pela comunidade científica alemã, em particular a Academia de Berlim, depois de já terem sido utilizados por cientistas estrangeiros interessados em eletricidade que compreenderam a sua pesquisa, as suas conseqüentes implicações e as ampliaram em diferentes aplicações tecnológicas. Esse reconhecimento por parte de seus compatriotas só chegou por volta de 1840, após inúmeras reivindicações de Ohm e de seus contemporâneos.

Durante a fase final de sua vida, Ohm recebeu importantes homenagens e premiações. Dedicou sua vida à ciência e permaneceu solteiro. A personalidade introspectiva de Ohm, e seus ideais altamente voltados para o intelecto, configuraram uma característica essencial do homem que fez a abstração matemática penetrar no domínio da eletricidade galvânica, até então essencialmente empírica. Infelizmente, a obtenção da tão sonhada cátedra de física aconteceu somente em primeiro de outubro de 1852, já no fim de sua vida. Como resultado de uma série de crises apopléticas, em 6 de Julho de 1854 ele morreu e foi enterrado no cemitério de Sudlich em Munique [3].

As investigações sobre a condutividade elétrica.

O anúncio oficial da pilha de Alessandro Volta em 26 de junho de 1800, dirigido a Joseph Banks da Royal Society, abriu as portas para as investigações sobre a eletricidade metálica — fazendo referência a visão contrária de Volta em relação à

idéia de que existiria uma “eletricidade animal”, difundida por alguns cientistas na segunda metade do século XVIII, dentre eles, Luigi Galvani. Volta demonstra a funcionalidade da pilha, a partir de dois metais distintos em contato com um condutor úmido (solução condutora). Nesta época a origem dessa eletricidade ainda não havia sido desvendada. Para todas as experiências com a pilha de Volta, procurava-se efeitos de eletricidade estática. Haja visto que ainda no século XVIII, Cavendish já havia feito uma comparação semi-quantitativa dos “poderes de condução” nos líquidos e nos sólidos. Como não havia abastecimento de corrente contínua, obviamente, ele descarregou uma garrafa de Leyden (uma forma de capacitor) por ele mesmo e pelo condutor ligado em série. Através do ajuste do comprimento do condutor ele percebeu que poderia obter a mesma intensidade de choque para várias descargas. Uma notável comparação feita por ele foi do “poder de condução” em água comum e água com sal.

Desta forma, Ohm não era a única pessoa interessada em condutividade elétrica em seu tempo. Humphry Davy (1778 — 1829), Peter Barlow (1776 – 1862) na Inglaterra e Antoine Becquerel (1788 – 1878) na França também estavam ativos. Em maio de 1825, quando Ohm publicou o seu primeiro artigo tratando deste tema, “*Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contaktelektricität leiten*” [Comunicação prévia da lei segundo a qual os metais conduzem eletricidade de contato], apareceu no *Bulletin des Sciences Mathématiques* de Ferrussac um resumo do trabalho de Becquerel e de Barlow sobre a condução em metais.

Humphry Davy disse que os poderes de condução dos metais variavam diretamente com suas massas e inversamente aos seus comprimentos; Becquerel mostrou que para se obter a mesma condutividade com fios do mesmo metal, era necessário que os seus comprimentos estivessem na mesma razão de suas seções transversais. No caso de Barlow, além de estudar a condutividade nos metais, ele também estava interessado na relação entre a intensidade da corrente, medida pela deflexão da agulha magnética, o comprimento e o diâmetro do condutor. A idéia de se medir a intensidade de corrente com uma agulha magnética, parte da descoberta da relação empírica entre eletricidade e magnetismo por Oersted, relatada em 1820. Barlow encontrou que a intensidade da corrente variava aproximadamente com o inverso da raiz quadrada do comprimento do fio e que, para fios de igual comprimento, ela aumentava com seus diâmetros somente até certo ponto, além do qual um aumento do diâmetro do fio não tinha efeito sobre a intensidade. Encontraram em outros experimentos de Barlow e Becquerel evidências de que o

efeito eletromagnético não variava sensivelmente ao longo do fio e que a condutividade diminuía com o comprimento. Assim, poderia se pensar que alguma grandeza relacionada com a corrente permanecia constante ao longo do circuito. Talvez essa evidência tenha de alguma forma influenciado o trabalho de Ohm, que conseguiu estabelecer com precisão matemática o que permanecia constante (a tensão, ou força eletroscópica) e o que diminuía gradualmente (a corrente). Entretanto não havia muita concordância entre Ohm e seus contemporâneos, e talvez por isso ele tenha preferido conduzir, sozinho, suas próprias pesquisas.

Aos 28 anos de idade, Ohm já gastava parte do seu tempo livre nos laboratórios de física melhorando suas habilidades, além de construir máquinas de fricção em seu apartamento. Em 1822, iniciou suas pesquisas utilizando as pilhas voltaicas e desenvolveu um experimento no qual pudesse estudar o comportamento de materiais condutores quando aplicados a um circuito galvânico.

Ohm também estabeleceu contatos com Johann Christian Poggendorff (1796-1877), que o inspirou no uso da fonte de termoeletricidade, e Johann Salomo Christoph Schweigger (1779-1857). Este último contribuiu com o trabalho experimental de Ohm, que se utilizou da descoberta do multiplicador de Schweigger (uma bobina constituída de fios metálicos), na tentativa de ampliar o desvio da agulha magnética – fundamental para tomada de medidas – ao ser conectado ao circuito voltaico. Provavelmente as correspondências freqüentes entre eles possibilitaram a troca de informação e o conduziram a escrever um artigo de demonstração experimental da sua lei em 1826.

A economia e o desenvolvimento tecnológico entre os séculos XVII e XIX.

O século XIX foi marcado pelo imperialismo e monopólio capitalista. O pensamento científico-tecnológico convergia para uma situação na qual a evolução da ciência estava intimamente ligada ao emprego das técnicas no contexto do desenvolvimento capitalista [8].

Inicialmente, na antiguidade clássica, estas duas correntes da tradição do conhecimento, a técnica e a ciência, foram mantidas separadas uma da outra. As observações astronômicas e a pesquisa em alquimia e óptica se destacavam enquanto conteúdo científico. Entretanto, o desenvolvimento de conhecimento técnico, era o que estabelecia uma interferência direta na evolução do contexto social.

A era moderna nos apresenta uma nova realidade no que diz respeito a concepção de ciência e tecnologia. O desenvolvimento dos recursos tecnológicos do feudalismo se estagna e a economia na Idade Moderna se rende a Renascença, proporcionando um ambiente favorável para o encontro dos cientistas e técnicos (ou artesãos), que tem como objetivo comum aplicar as técnicas e teorias em prol de uma sociedade em plena transformação econômica e social.

O estreitamento das inter-relações entre o conhecimento científico e técnico produziu efeitos notados principalmente na infra-estrutura econômica e política da sociedade. Na mesma proporção em que a sociedade recorre a esta nova forma de saber, mesmo que de forma especulativa, faz com que a ciência e a técnica produzam novos métodos, investigações e descobertas em sintonia com a evolução das leis que regem a evolução do meio social.

O século XIX, então transformado pelas revoluções Francesa e Industrial, apresenta uma crescente integração entre as demandas industriais e o alargamento das bases teóricas e de investigações científicas. Vários foram os campos da ciência absorvidos à prática industrial. Dentre eles podemos destacar a química e os estímulos aos setores industriais de mineração, cerâmica, metalurgia, têxtil e iluminação a gás; o avanço da geologia e a paleontologia, ocorridos devido à importância econômica das atividades de mineração; o novo campo de investigação da biologia — a bacteriologia — potencializa, através dos processos de fermentação e pasteurização, a produção de cerveja, vinhos, queijos e curtimento de peles; as leis termodinâmicas, como uma das principais sínteses teóricas deste período, se apresentam no poder da expansão do vapor para converter calor em trabalho útil, aplicados nas indústrias e também nas locomotivas a fim de imprimir maior velocidade no escoamento da produção.

Um fato curioso, e também relevante para o nosso trabalho, aponta para um importante campo de investigação científica deste período e também dos dias atuais — o eletromagnetismo — que atravessou essa fase estimulando o setor produtivo. Este ramo da ciência foi pioneiro em se desenvolver enquanto indústria. A descoberta da corrente elétrica (1786), o anúncio da pilha de Volta e a descoberta da eletrólise (1800), a conexão entre eletricidade e magnetismo relatada por Oersted (1820), marcaram o surgimento de novos segmentos industriais tais como a galvanoplastia, o telégrafo e ainda o setor de iluminação. Este desenvolvimento revela talvez um dos primeiros exemplos históricos das transformações de teorias científicas em setores produtivos [9].

As descobertas eletromagnéticas e o contexto econômico do século XX.

Por volta de 1850, grande parte do mundo em desenvolvimento se encontrava mapeado e interligado através da navegação, das ferrovias e do telégrafo. A invenção e a expansão do telégrafo elétrico pelo mundo marcaram um dos principais momentos onde a pesquisa científica motivou o desenvolvimento tecnológico aliados a outros interesses. Para se ter uma idéia, uma carta remetida de Londres, por exemplo, demorava 30 dias para chegar a Calcutá. Neste período, a necessidade de se transmitir informações com maior velocidade era fundamental para a tomada de decisões tanto no campo político quanto no econômico. A série de descobertas no âmbito da eletricidade e do magnetismo a partir do final do século XVIII culminou no desenvolvimento de diferentes tipos de telégrafos elétricos, desde os telégrafos que codificavam as mensagens através da hidrólise da água até chegar aos telégrafos de Morse.

Em 1795, o médico espanhol Francisco Salvá (1751-1828) foi pioneiro em transmitir mensagens por meio da descarga de um condensador. O mesmo Salvá, em 1804, criou outro tipo de telégrafo elétrico constituído por fios (cada um correspondendo a uma letra), por vasos de água nas extremidades e por uma pilha de Volta. A letra transmitida era detectada pela formação de bolhas gasosas formadas no vaso correspondente à letra. As bolhas eram obtidas por eletrólise da água. Com este sistema ele conseguiu enviar mensagens até um quilômetro de distância. Em 1812, o Dr. Samuel von Sömmering (1755-1830) de Munique, na Alemanha, atingiu três quilômetros de distância com um telégrafo do mesmo tipo. O seu sistema era constituído por vinte e quatro fios ligados a vinte e quatro voltâmetros que correspondiam à vinte e quatro letras do alfabeto e mais dez para algarismos.

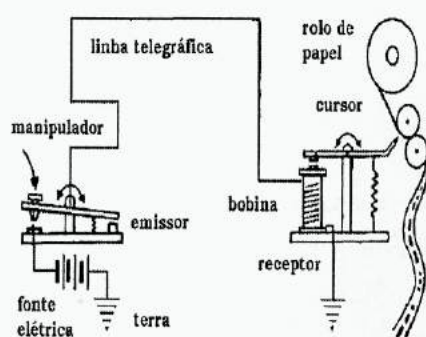
Em 1819, Hans Christian Oersted (1777-1851), ao observar o comportamento da agulha magnética, descobriu que esta poderia ser defletida mediante a passagem de uma corrente elétrica por um fio que lhe ficasse suficientemente próximo; ele verificou também que a deflexão variava para a esquerda ou para a direita conforme o sentido da corrente. Um ano depois, Johann Salomo Christoph Schweigger (1779-1857) comprovou que a deflexão da agulha magnética podia ser aumentada, desde que fosse envolvida por espirais de arame (bobina). Em 1825, William Sturgeon (1783-1850), na Inglaterra, inventou o eletromagneto. A ação da corrente elétrica no magneto foi aplicada pela primeira vez à telegrafia por André Marie Ampère (1775-1836), em 1820, atendendo a uma sugestão de Pierre Simon Laplace (1749-1827).

Segundo este, pequenos magnetos instalados na extremidade de recepção de 26 fios poderiam ser usados para indicar as letras do alfabeto. Este avanço nas descobertas científicas associando eletricidade e magnetismo possibilitou o contínuo aperfeiçoamento do telégrafo elétrico.

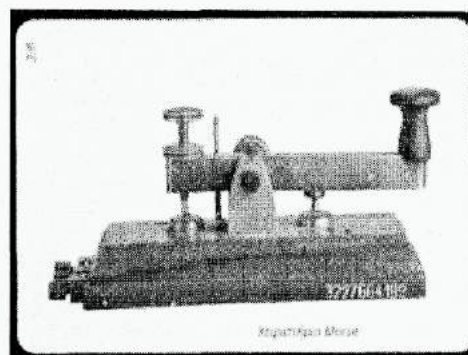
Em 1832, o diplomata e barão russo Pawel Schilling (1786-1837) inventou um sistema de telégrafo elétrico com a inovação de necessitar apenas de seis fios, ao contrário dos anteriores. As letras transmitidas eram detectadas pelo movimento de agulhas magnéticas colocadas sobre bobinas. Ao serem percorridas por corrente, as bobinas produziam campos magnéticos que faziam desviar as agulhas. Também os físicos alemães Johann Gauss (1772-1855) e Wilhem Weber (1804-1891) fizeram funcionar um telégrafo em 1833, baseado nos movimentos da agulha magnética. O inglês William Cook (1806-1879) viu uma demonstração do telégrafo de Schilling em 1836 em Heidelberg e construiu vários aparelhos semelhantes, associando-se a Charles Wheatstone (1802-1875), professor do King's College de Londres. O primeiro telégrafo por eles desenvolvido foi patenteado em 1837. Tinha seis fios e cinco agulhas magnéticas, donde lhe veio o nome de telégrafo de cinco agulhas. As agulhas eram acionadas por eletroímãs. Eram acionadas duas agulhas de cada vez e cada letra era definida por duas agulhas. Este sistema foi usado em 1839 na Inglaterra, numa distância de 21 quilômetros, servindo para informar as posições dos comboios. Tornou-se o primeiro serviço telegráfico comercial e foi também o primeiro uso comercial da eletricidade. Para chegar a este ponto foi necessário o desenvolvimento de várias técnicas, envolvendo as pilhas elétricas, os eletroímãs e a fabricação de fios de cobre em lugar dos fios de ferro. Mais tarde, em 1839, William Cook e Charles Wheatstone criaram um telégrafo mais simples, o telégrafo de 2 agulhas, que podia transmitir até vinte e duas palavras por minuto.

O telégrafo de Morse proporcionou uma evolução significativa para a comunicação à distância, apesar de ser o mais simples dos telégrafos apresentados até agora. A grande inovação foi a elaboração de um código que facilitasse essa comunicação. O código foi elaborado utilizando pontos, traços e espaços, com o objetivo de representar as letras do alfabeto. O sistema de telegrafia implantado a partir do código Morse podia ser mais facilmente instalado e mantido, o que significava economia em relação aos tipos anteriormente inventados. Samuel Finley Breese Morse (1791-1872) registrou sua patente em 1838 e enriqueceu com sua companhia telegráfica ignorando o fato de que o código utilizado, mais tarde

batizado com seu nome, na realidade tenha sido desenvolvido pelo alemão Friedrich Clemens Gerke (1801-1888) [10].



(a)



(b)

Figura 2. (a) Esquema elétrico e (b) foto do acionador (manipulador) desenvolvido por Morse [11].

Em poucos anos a febre telegráfica havia tomado grandes proporções. Em 1844 já existia uma linha telegráfica ligando Baltimore a Washington, com os cabos percorrendo uma distância de sessenta e quatro quilômetros. Na década seguinte, a Europa integrava suas linhas nacionais a outros países, formando uma grande rede de comunicação que cobria quase todo o continente. A Grã-Bretanha investiu bastante no desenvolvimento da telegrafia submarina, tendo em vista a sua grande preocupação: Devido a sua localização geográfica, poderia acontecer um possível isolamento com o resto do mundo, de forma a prejudicar sua posição de, então, grande potência. Infelizmente, a telegrafia submarina encontrou alguns obstáculos quando se tratava da dificuldade na recepção do sinal com cabos instalados a grandes distâncias. Após o sucesso da linha instalada no Canal da Mancha em 1851, cientistas como William Thompson (1824-1907) e James Clerk Maxwell (1831-1879) se debruçaram sobre esta problemática, e somente quinze anos depois o cabo atlântico foi instalado com sucesso [12]. No Brasil, o desenvolvimento do sistema telegráfico iniciou-se em 1852, motivada pelo interesse em se criar um instrumento de combate

ao tráfico negreiro, e foi incentivada pelo então Ministro da Justiça Eusébio de Queiroz Coutinho Mattoso Câmara (1812-1868) [13].

Os sistemas telegráficos são formados de quatro partes: o gerador de eletricidade — que através da corrente elétrica provoca a deflexão das agulhas e o acionamento dos magnetos; as linhas de transmissão — que são formadas por um cabeamento (condutor) que liga o transmissor ao receptor; um manipulador ou transmissor — a parte do sistema telegráfico responsável pela geração da mensagem; e, finalmente, o receptor — cuja função é receber e decodificar a mensagem enviada. A formação desse sistema telegráfico sugere a utilização de cabos condutores de eletricidade, usualmente instalados a grandes distâncias e responsáveis pela transmissão das mensagens. Já mencionamos aqui que tanto Ohm como outros cientistas estavam envolvidos nas pesquisas sobre as propriedades dos condutores quando ligados ao circuito galvânico com a pilha de Volta. Georg Simon Ohm esteve inserido com sua pesquisa dentro deste panorama histórico apresentado acima. Acreditamos que a necessidade de se estudar o comportamento dos condutores que seriam utilizados nos cabeamentos dos sistemas telegráficos, tenha motivado e influenciado direta ou indiretamente as pesquisas de Ohm, apesar de não encontrarmos registros dessa conexão.

4. AS ATIVIDADES EXPERIMENTAIS DE OHM

As contribuições dos contemporâneos de Ohm

Como na história de muitos trabalhos científicos, os experimentos e o trabalho teórico de Ohm também foram influenciados por seus contemporâneos. Na construção dos dois principais experimentos — como veremos a seguir em mais detalhes — três importantes nomes da ciência estiveram envolvidos: Charles Coulomb (1736 – 1806), Christian Oersted (1777 – 1851), Thomas Seebeck (1770 – 1831) e Alessandro Volta (1745 – 1827). Situaremos, a seguir, esses nomes e suas descobertas no tempo e no importante espaço que ocuparam na história dos trabalhos de Ohm que estamos buscando desvendar.

Coulomb e sua balança de torção.

O francês Charles Augustin de Coulomb (1736 – 1806) foi um grande personagem da história da física e da engenharia. Suas contribuições mais importantes ocorreram nos campos da eletricidade, do magnetismo, da mecânica aplicada e nos estudos do atrito e da torção. Coulomb se formou como primeiro-tenente no batalhão de Engenharia, em 1761. Trabalhou como engenheiro militar participando ativamente de projetos e pesquisas durante vinte anos. Quando se casou, em 1781, optou de vez pelas pesquisas em física, exercendo a engenharia somente como consultor. Entre 1781 e 1806, Coulomb apresentou vinte e cinco memórias científicas à Academia de Paris (e ao Instituto de France, que a sucedeu). As mais conhecidas são as memórias sobre eletricidade e magnetismo, além daquelas sobre a torção e as aplicações da balança de torção. [3]

A pesquisa de Coulomb sobre a melhor maneira de fabricar agulhas imantadas, de 1777, apresentava uma solução simples e elegante para o problema da torção de cilindros e também uma teoria da torção em fios finos de seda e de cabelo. Ele foi pioneiro em indicar que a suspensão de torção poderia fornecer aos físicos um método para medir com precisão forças extremamente pequenas. Ocasionalmente,

conseguiu medir forças de menos de 9×10^{-4} dinas (9×10^{-9} N). Em 1784, em sua pesquisa teórica e experimental sobre a força de torção e sobre a elasticidade de fios metálicos, Coulomb procurou descobrir as leis e determinar possíveis aplicações da torção e investigar as leis da coerência e da elasticidade de corpos por meio da torção. Ele desenvolveu a equação fundamental para o torque em cilindros finos: $M = (\mu BD^4) / L$, em que M é o torque; μ , um coeficiente constante de rigidez; B , o ângulo de torção; e D e L , o diâmetro e o comprimento do cilindro, respectivamente.

Dentro da série de sete memórias apresentados por Coulomb na década de 1780 está descrita a adaptação sofrida pela balança de torção para os seus estudos elétricos. A Figura 3 apresenta um esquema da primeira balança de torção eletrostática de Coulomb e suas partes. Seu diagrama está originalmente incluído e devidamente descrito nas memórias de Coulomb (finalmente publicado em 1788).

Com a balança, Coulomb estabeleceu estaticamente a lei do inverso do quadrado para o caso de dois corpos carregados. No aparato, uma agulha magnética ou uma esfera carregada, era suspensa da balança de torção, a certa distância de outra agulha, ou esfera carregada, fixa sobre um suporte. A agulha suspensa facilitava a medição dos minutos de força sem se perturbar por conta dos efeitos como o atrito. No caso do estudo eletrostático, uma vez que as duas esferas estivessem igualmente carregadas, elas se repeliam imediatamente. Coulomb explicou que a repulsão poderia ser medida girando o micrômetro, a fim de forçar as esferas a ficarem juntas.

A partir dos padrões de medidas realizadas alterando-se as distâncias entre as esferas e lendo as respectivas medidas dos ângulos, Coulomb então especulou que esses números mostravam que quando a distância entre as esferas eletrizadas era dividida a metade, sua força de repulsão era quadruplicada — e que tal relação revelava uma lei do inverso do quadrado, sugerindo a seguinte relação de proporcionalidade entre a força (de atração e repulsão), as cargas das esferas e a distância entre os centros das esferas: $F_e \propto (q_1 q_2) / d^2$, ou na sua forma atual $F = k q_1 q_2 / d^2$, considerando a constante de proporcionalidade k . Esta relação atualmente é conhecida — talvez pelo sucesso de Coulomb ao desenvolver o experimento e associar seus resultados às teorias das forças gravitacionais de Isaac Newton — como a lei de Coulomb, e a sua balança de torção se tornou um dos melhores instrumentos experimentais conhecidos até então, e foi comercializado em várias versões por fabricantes de instrumentos da Europa e dos Estados Unidos. [14]

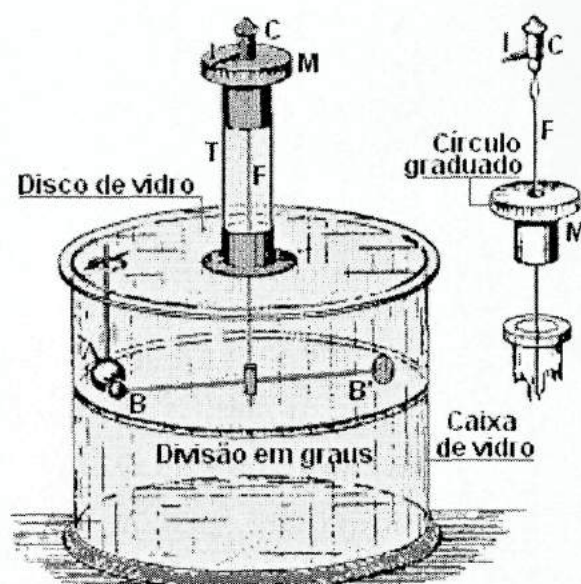


Figura 3. Esquema da balança de torção eletrostática de Coulomb [15].

Oersted e o início do eletromagnetismo.

Hans Christian Oersted (1777-1851) nasceu na Dinamarca e era o filho mais velho do farmacêutico Søren Christian Oersted. O contato com o trabalho do pai e seus talentos inatos para a ciência o levou a adquirir conhecimentos práticos dos fundamentos da química. Oersted cursou a Universidade de Copenhague e foi lá que se aprofundou nos estudos da astronomia, física, matemática, química e farmácia. Ele se formou em farmácia no ano de 1797. Entretanto, sua trajetória foi marcada pelo seu envolvimento com a filosofia natural e também com a pesquisa e a divulgação científica. Em 1824, ele fundou a Sociedade para Promoção da Ciência Natural e, em 1829, ele tornou-se diretor do Instituto Politécnico de Copenhague, posto em que se manteve até morrer [3].

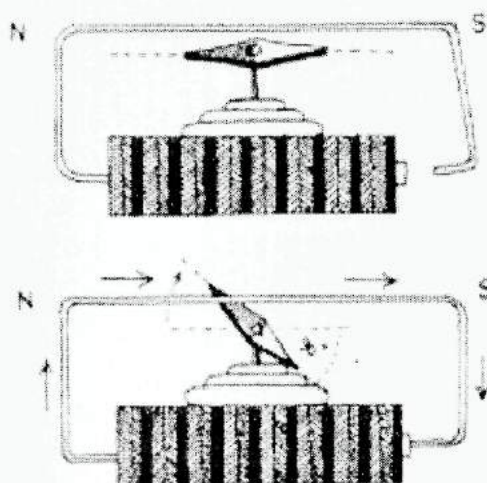


Figura 4. Experimento de Oersted. A figura ilustra a experiência descrita no texto. A agulha magnética é movida pela passagem da corrente no circuito [16].

O que mais contribuiu para o desenvolvimento intelectual de Oersted foi o curso sobre Kant e sua filosofia crítica. Para Oersted, Kant dizia, basicamente, que a ciência não era apenas a “descoberta” da natureza, isto é, o cientista não apenas registrava fatos empíricos e os reunia em fórmulas matemáticas. A mente humana impunha padrões à percepção, e esses padrões eram as leis científicas. A existência da razão garantia que esses padrões não eram arbitrários. Esses pressupostos filosóficos conduziram Oersted a sua descoberta mais importante: o eletromagnetismo.

O eletromagnetismo não era um efeito previsto pelas teorias corpusculares ortodoxas da época. Na década de 1780, acreditava-se — e Coulomb parece ter provado — que a eletricidade e o magnetismo seriam duas espécies de matéria de naturezas diferentes, cujas leis de ação seriam semelhantes. Não se pensava até então na possibilidade de se converter uma em outra. Oersted tinha uma visão diferente. Ele acreditava na idéia de conversão de forças e o que faltava era definir em quais condições isso poderia ocorrer.

No ano de 1820, Oersted ministrando um curso sobre eletricidade, galvanismo e magnetismo para um público já familiarizado com os princípios da filosofia natural, realizou um experimento no qual pretendia demonstrar que a corrente elétrica poderia provocar um efeito magnético. Para isso, ele usou um simples aparelho galvânico — a pilha — ligado a um fio de platina muito fino, colocado sobre uma bússola coberta por um vidro. Ao fechar o circuito bússola foi levemente perturbada. O efeito não causou grande impressão inicialmente no público e no próprio Oersted. Somente após três meses de pesquisas foi que conseguiu certificar-se de que um fio que transporta uma corrente é envolvido por um campo magnético circular, que poderia então perturbar o campo magnético da bússola. Essa descoberta abriu uma nova época na história da física, e como veremos adiante, serviu de base para estudos de outros cientistas — assim como Ohm — no ramo da eletricidade [3].

Alessandro Volta e a sua pilha.

Alessandro Giuseppe Antônio Anastásio Volta (1745 — 1827) foi um cientista italiano, nascido de uma família nobre extremamente ligada à Igreja Católica. Volta cresceu sob influência das doutrinas e observâncias da Igreja de Roma, o que lhe rendeu sabores e dissabores ao longo de sua vida. Aos 18 anos, contrariando a vontade de seus familiares, Volta se encaminhou para o estudo do que viria ser a sua grande paixão: a eletricidade.

Na década de 1760, alguns cientistas estavam empenhados em desvendar os mistérios da eletricidade estática. Alessandro Volta acompanhava os trabalhos de Jean Antoine Nollet (1700 – 1770) e Giovanni Batista Beccaria (1716 – 1781), e sempre que possível lhes escrevia quando lhe ocorriam dúvidas ou para apresentar sugestões. Ao longo do seu trabalho com eletrostática, Volta percebeu a necessidade de construir aparelhos eficientes e de baixo custo, começando assim, a demonstrar toda sua habilidade, comportamento que caracterizou sua carreira.

Em 1774, por decisão dos governantes de sua cidade natal, assumiu seu primeiro emprego acadêmico no Ginásio Real de Como. Após realizar muitas experiências, Volta inventou o eletróforo, um dispositivo usado para gerar eletricidade estática através do atrito.

Volta também realizou trabalhos no ramo da meteorologia e da pneumática. No primeiro, se interessou pela eletricidade atmosférica, cujo estudo havia

começado em 1752 com a aparente confirmação da hipótese de Franklin sobre o caráter elétrico do raio. Na pneumática, Volta estudou os princípios gerais dos “gases inflamáveis”, principalmente o metano [3].

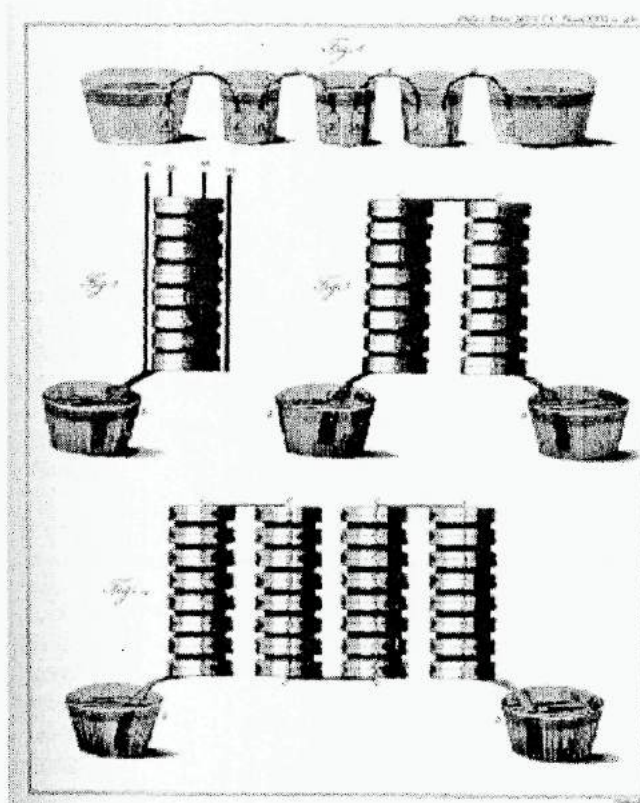


Figura 5. Esquema original da Pilha de Volta com uma descrição dos seus possíveis arranjos [17].

O trabalho de maior repercussão realizado por Alessandro Volta foi motivado pela publicação, em 1791, do estudo da excitação elétrica de pernas dissecadas de rãs, de autoria de Luigi Galvani (1737 – 1798). Galvani defendia a tese de que o contato de dois metais diferentes em um músculo de rã gerava um fluido elétrico, caracterizado pelos espasmos observados no corpo dessas rãs quando o circuito era fechado. Quanto ao fluido elétrico, ele acreditava ser semelhante à eletricidade por atrito,

porém distinto, indicando uma eletricidade “animal” específica. Volta quando soube do trabalho, o descartou, considerando-o “inacreditável”. Ele admitia a “eletricidade animal” somente no peixe elétrico, ao qual atribuía à capacidade de manipular o fluido elétrico comum.

Volta começou a fazer experiências com metais em 1794 e descobriu que o tecido animal não era realmente necessário para produzir a corrente elétrica. Essa descoberta levou a muitas disputas entre os adeptos da eletricidade animal e os defensores da eletricidade metálica. Quando ele inventou a primeira bateria elétrica (a “Pilha de Volta”), provou estar certo. A pilha era formada por pares de discos de prata e zinco separados por pedaços de papelão úmidos. Volta observou que para aumentar a eletricidade galvânica bastava colocar os discos de metais diferentes empilhados alternadamente e em contato direto.

Seu trabalho foi magnificamente ilustrado por uma carta dirigida ao então presidente da Royal Society, e datada de 20 de março de 1800. Nesta carta, publicada na *Philosophical Transactions*, Volta descreve a sua pilha elétrica com um arranjo alternativo, uma “coroa de taças”, que consistia em um conjunto de vidros cheios de água salgada ou alcalina e conectados por arcos bimetálicos mergulhados no líquido. Esta descoberta foi determinante para o desenvolvimento científico e tecnológico do século XIX [3].

A termoeletricidade de Seebeck.

Thomas Seebeck (1770 – 1831), o descobridor da termoeletricidade e um dos mais distintos físicos experimentais do início do século dezenove, nasceu na Estônia em uma próspera família mercantil. Em 1802, ele se formou em medicina pela Universidade de Göttingen, em Berlin. Como Seebeck desenvolveu um interesse forte nas ciências naturais, ele decidiu se dedicar a pesquisa científica ao invés da prática médica.

Em 1820, Seebeck se mudou para Berlin interessado nos fenômenos magnéticos. Entretanto, a sua mais significativa descoberta se deu no campo da termoeletricidade — ou termomagnetismo, como ele a denominou em 1822. Enquanto ele estava estudando a influência do calor nos arranjos galvânicos, lhe ocorreu que o calor deveria criar o magnetismo em dois diferentes metais acoplados para formar o circuito fechado. Ele conectou um pedaço semicircular de bismuto

com um de cobre e colocou suas extremidades juntas para formar um círculo. Quando o calor era aplicado na junção de cobre-bismuto, uma agulha magnética se movia, como se o círculo estivesse fechado, desta forma corrente estaria percorrendo o circuito. Pela repetição deste experimento muitas vezes com diferentes pares de metais e outros condutores, Seebeck estava habilitado a ordenar os vários metais a partir de sua condutividade, na série termoeétrica com o bismuto no extremo negativo e o telúrio no extremo positivo. Ele não acreditava, contudo, que uma corrente elétrica estava realmente presente nos anéis bi metálico e preferia descrever seus efeitos como “termomagnetismo” [2]. Hoje sabemos que o efeito Seebeck deriva de uma propriedade física dos condutores metálicos submetidos a um gradiente térmico em suas extremidades: a extremidade mais quente faz com que os elétrons dessa região tenham maior energia cinética e se acumulem no lado mais frio, gerando uma diferença de potencial elétrico entre as extremidades do condutor na ordem de alguns milivolts.

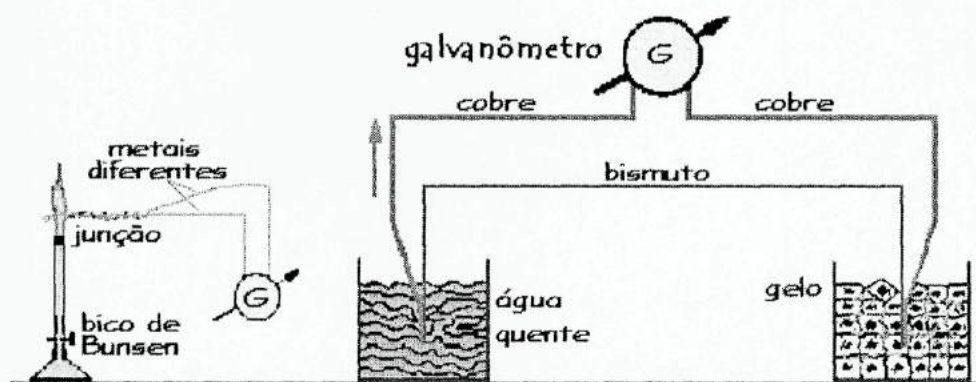


Figura 6. Esquemas possíveis para a representação da junção termoeétrica de Seebeck [18].

As investigações preliminares de Ohm.

O primeiro artigo de Ohm, publicado em maio de 1825, foi intitulado “Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contactelektricität leiten” [Comunicação prévia da lei segundo a qual os metais conduzem eletricidade de

contato]. O seu objetivo neste trabalho era o de encontrar uma relação entre o decréscimo da força eletromagnética exercida por um fio condutor de corrente e o comprimento desse fio. Este experimento será descrito aqui por apresentar a base experimental para o principal trabalho de Ohm, publicado em 1827 e sobre o qual discutiremos os resultados posteriormente.

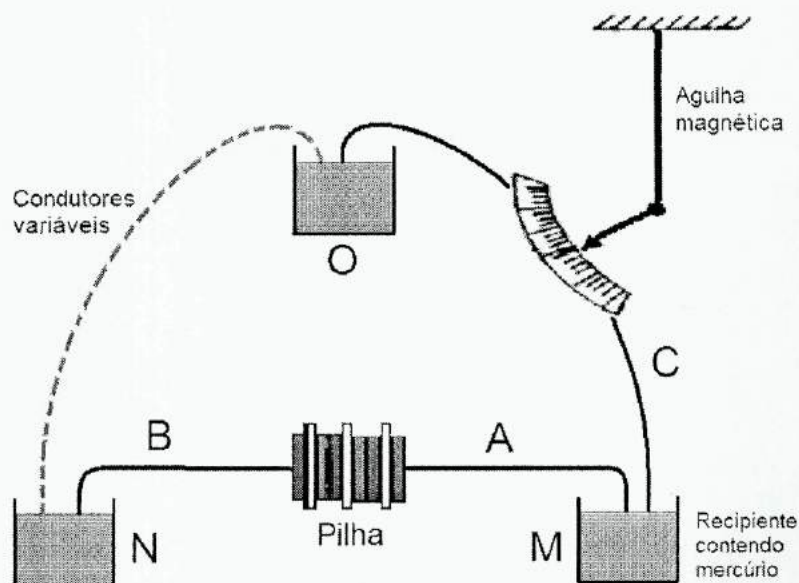


Figura 7. Esquema do primeiro aparato de Ohm [19].

O aparato experimental preliminar de Ohm consistia de uma pilha voltaica, ligada a dois fios, A e B, cujas extremidades livres terminavam em pequenos recipientes contendo mercúrio, M e N; entre M e outro recipiente, O, estava o terceiro fio, C. Juntos, A, B e C formavam o que poderíamos chamar de “circuito equivalente”, para se diferenciar dos outros sete fios condutores com comprimentos diferentes que seriam usados como “condutores variáveis” ou “condutor de teste”, quando colocados entre os recipientes O e N. Os recipientes de mercúrio eram usados como conectores nos quais os condutores seriam introduzidos de forma a estabilizar o circuito. Estes “condutores variáveis” tinham características diferentes:

havia um fio relativamente curto, com quatro polegadas de comprimento, e muito grosso, chamado também de condutor “padrão” e outros seis mais finos, com diâmetro de 0,3 linha¹ (0,063 cm) e comprimentos variando de 1 a 75 pés² (aproximadamente 30 centímetros a 23 metros). Sobre o fio C estava suspensa uma agulha magnética suspensa por um fio de boa torção — inspirada na balança de torção de Coulomb.

Para computar seus dados, Ohm teria feito uma série de testes alternando os condutores variáveis e comparando-os com o padrão. Ao fechar o circuito com os condutores a corrente circulava e, assim, a agulha se movimentava para algum ponto da escala graduada onde se realizaria a medida da “força” da corrente. O condutor padrão se caracterizava por fazer com que os terminais da bateria quase entrassem em curto. A diminuição da força da corrente era determinada para cada condutor variável na comparação com o padrão [3].

Não sabemos os motivos pelos quais Ohm optou por medir a diminuição da força (*Kraftverlust*)³ ao invés da própria força. Acredita-se que Ohm, conhecendo o fato de que um condutor diminui o efeito magnético de uma corrente elétrica inversamente com sua condutividade, teria então considerado usar a medida da “quantidade de força” de um condutor variável sendo subtraída de alguma “quantidade de força ideal”, medida a partir do condutor “padrão”.

A seguir podemos observar um dos registros de laboratório de Ohm datado de 18 e 23 de julho de 1825. A primeira série de leituras, realizadas com uma bateria construída a partir de uma forte solução salgada, parece mostrar simplesmente um estudo da taxa de decaimento da corrente. Estes valores de “força” da corrente provavelmente foram medidos fechando-se o circuito com o condutor padrão. Infelizmente pelas informações dos registros, não conseguimos identificar qual seria o intervalo de tempo entre o primeiro valor e o último registrado.

A segunda série de leituras apresenta os dados do experimento para comparar a “força” da corrente para vários condutores diferentes, como descrevemos acima. É importante observar a alternância do “0”, que seria do condutor padrão, com o número dos condutores variáveis (de 1 a 6) e a anotação do “9” como sendo o ajuste de zero da divisão do disco graduado. Este ajuste de zero deveria ser considerado — ou seja, subtraídos de todos os valores de “força da corrente” medidos através do

¹A unidade de comprimento linha é uma antiga unidade de comprimento que equivale a 0,21 centímetros.

²A unidade de comprimento pé equivale a 30,48 centímetros.

deslocamento da agulha magnética. A segunda coluna desta segunda série de registros apresenta o que seria para Ohm a medida da “perda ou diminuição da força” da corrente, para cada condutor variável, numerados de 1 a 6. Desta forma a variável dependente neste caso seria a razão entre a medida da “força” da corrente do referido condutor variável, com a medida da “força” da corrente do condutor padrão, que chamaremos de primeiro caso [20].

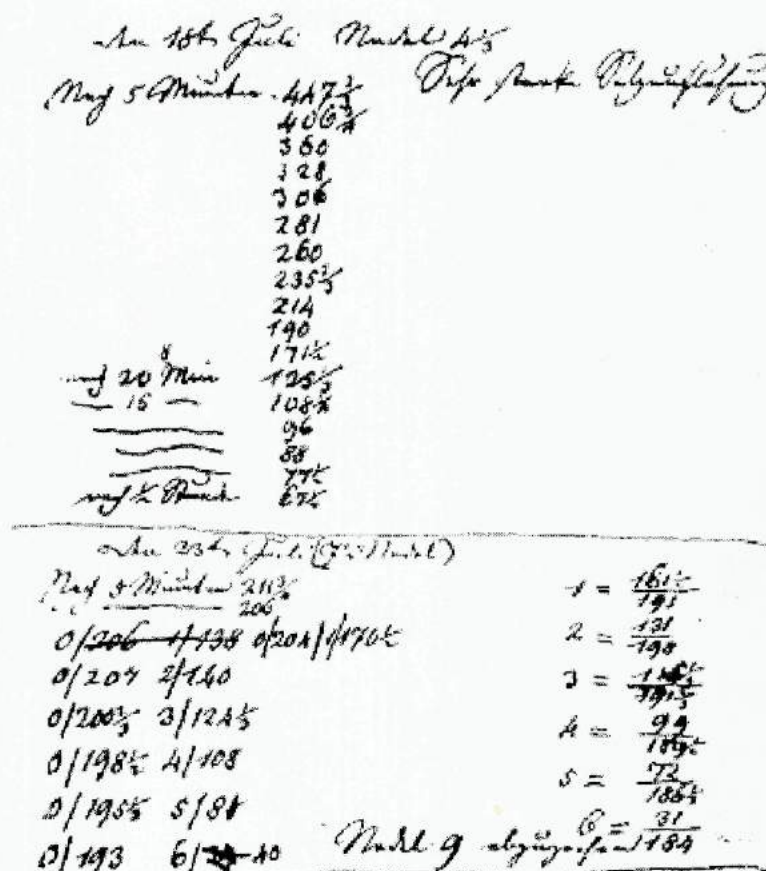


Figura 8. Registros de Laboratório de Ohm, datados de 18 e 23 de julho de 1825 [20].

³ Kraftverlust — é o termo usado por Ohm para definir a “diminuição da força”.

Podemos ainda nos referir a “perda de força” como sendo igual à diferença entre os valores medidos com condutor “o” e o condutor variável dividido pela “força” do condutor “o”, que chamaremos aqui de *segundo caso* [21]. Entretanto, o que seria relevante para nossa pesquisa é o fato de Ohm, nesse primeiro trabalho, preferir trabalhar com a perda de força, ao invés da própria força. Trabalhando com os dados e considerando as duas formas de encontrar a variável dependente que se relacionará com o comprimento dos fios, observamos que, em ambos os casos, não haveria alteração na taxa de decaimento da corrente. Esta afirmação considera que o valor da “força” do condutor padrão seja diferente em cada medida, por conta da instabilidade da pilha voltaica. Logo a diferença seria devido às duas possíveis formas de interpretação dos resultados de acordo a manipulação dos dados.

Tabela 1. Dados de Ohm tabulados de acordo com o primeiro caso.

<i>Condutores variáveis</i>	<i>Força da corrente</i>		<i>1º caso</i>	
	<i>Condutor padrão</i>	<i>Condutor variável</i>	<i>Perda de força (corrente)</i>	
<i>cv</i>	<i>Fcp</i>	<i>Fcv</i>	<i>Fcv/Fcp</i>	<i>%</i>
1	195,5	161,5	0,82609	82,6
2	198	131	0,66162	66,2
3	191,6	115,3	0,60177	60,2
4	189,5	99	0,52243	52,2
5	186,3	72	0,38647	38,6
6	184	31	0,16848	16,8

Observe a tabulação acima com os dados que já estariam corrigidos do fator “9” do ajuste de zero da escala graduada. Em vermelho na primeira coluna temos a numeração sequencial utilizada por Ohm para identificar os comprimentos equivalentes dos condutores variáveis (ou de teste). A última coluna apresenta a porcentagem de “força” (corrente) ainda presente no circuito, para cada condutor de teste, em relação ao valor encontrado com o condutor padrão. Verificamos que para um aumento no comprimento do condutor de teste, existe um decréscimo na “força”

eletromagnética no condutor relativo ao valor encontrado dessa “força” quando medido com o condutor padrão.

A segunda tabela difere apenas pelas duas últimas colunas onde — de acordo com o segundo caso, — tabulamos os valores da “força” a partir da diferença entre os valores medidos com o condutor padrão e com os condutores de teste. Observamos novamente uma “perda de força” eletromagnética à medida que os diferentes condutores variáveis são testados no circuito. Entretanto, a última coluna representa os valores percentuais de “aumento na perda de força”, o que em termos práticos, é exatamente igual à análise anteriormente realizada.

Tabela 2. Dados de Ohm tabulados de acordo com o segundo caso.

<i>Condutores variáveis</i>	<i>Força da corrente</i>		<i>2º caso</i>	
	<i>Condutor padrão</i>	<i>Condutor variável</i>	<i>Perda de força (corrente)</i>	
<i>cv</i>	<i>Fcp</i>	<i>Fcv</i>	<i>(Fcp-Fcv)/Fcp</i>	<i>%</i>
1	195,5	161,5	0,17391	17,4
2	198	131	0,33838	33,8
3	191,6	115,3	0,39823	39,8
4	189,5	99	0,47757	47,8
5	186,3	72	0,61353	61,4
6	184	31	0,83152	83,2

O próximo passo de Ohm foi tentar descobrir uma lei que representasse bem os dados obtidos neste primeiro experimento. Ele encontrou — acredita-se que de forma puramente empírica — a equação geral:⁴

$$v = m \log(1 + x / a). \quad (1)$$

Nesta equação, v representa a diminuição da força da corrente, x é o comprimento do fio em pés, e a seria o comprimento equivalente do condutor padrão. O coeficiente m seria uma função da força medida com o condutor padrão,

da espessura do fio, do valor de a e da “tensão elétrica da força”. Esta equação foi confirmada por Ohm em experimentos posteriores, passando então a considerá-la como a lei procurada.

Ao longo de nossas pesquisas encontramos uma demonstração da fórmula logarítmica de Ohm resultando em uma boa aproximação dos resultados previstos pela teoria de Ohm [21]. Se nós pegarmos v , a perda da força, sendo diretamente proporcional a diminuição (fracionária) da corrente, e expandindo a função logarítmica para x menor que a nós obteremos uma expressão análoga a moderna aproximação para o circuito com a fonte de resistência interna relativamente grande. Mais explicitamente:

$$\begin{aligned} v &= m \log(1 + x/a) \\ &= m[\log(a+x) - \log a], \end{aligned} \quad (2)$$

Para $0 < x < a$,

$$\log(a+x) = \log a + \frac{x}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{a} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{x}{a} \right)^3 - \dots, \quad (3)$$

Os termos $\log a$ se cancelam e desconsiderando os outros valores de x/a , assim:

$$v = m \left(\frac{x}{a} \right). \quad (4)$$

Uma moderna aproximação procederia como se segue. Nós podemos considerar o circuito fechado com o condutor padrão como um pequeno circuito, já que a resistência de a , o fio teste, devido as suas características, seria aproximadamente cinquenta vezes maior que o valor do condutor padrão. Temos que I_n será a corrente (proporcional a “força” da corrente no condutor padrão que aparecia na agulha magnetizada), E a fem constante, e R a resistência interna da pilha. O r seria a resistência de um fio teste cuja corrente é I_o . Então:

$$I_n = \frac{E}{R} \quad (5)$$

⁴ Log, no original. Mais adiante veremos que Ohm considera log como o logaritmo natural.

e

$$I_0 = \frac{E}{r + R}. \quad (6)$$

Determinando-se a diferença

$$I_n - I_0 = E \left[\frac{1}{R} - \frac{1}{r + R} \right], \quad (7)$$

observamos que, para $r \ll R$, obtemos

$$\begin{aligned} \frac{I_n - I_0}{I_n} &= \frac{E}{I_n} \left[\frac{1}{R} - \frac{1}{R(1 + r/R)} \right] = \frac{E}{I_n} \frac{1}{R} \left[1 - \left(1 - \frac{r}{R} + \frac{r^2}{R^2} - \dots \right) \right] \\ &\approx \left(\frac{E}{I_n} \right) \cdot \left(\frac{r}{R^2} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Existe, portanto, uma aproximação entre a equação (4) — resultado da expansão da equação de Ohm (1) — com o resultado demonstrado a partir das notações e conceituação modernas (8). Inicialmente, Ohm acreditava que a perda da “força” seria total para um condutor suficientemente longo, como exigido pela fórmula. Com estudos posteriores, Ohm concluiu que esta aproximação falharia para condutores longos, em termos atuais, quando a resistência externa se aproxima ou excede o valor da resistência interna.

Durante a realização de suas experiências, Ohm encontrou algumas dificuldades com seu aparato. Quando Ohm abria ou fechava o circuito, aparecia uma espécie de onda — o que hoje poderíamos chamar de um pico de corrente — que Ohm acreditava ser devido a flutuações na pilha. Para contornar a situação, Ohm aguardava alguns instantes para fazer a leitura da posição marcada pela agulha magnética. Por outro lado, Ohm se incomodava com a perda ininterrupta da força da sua pilha. Neste caso, já sabemos que ele interpolava os valores medidos com o condutor padrão para minimizar os efeitos dessa variação. Sabendo destes inconvenientes, Poggendorff sugeriu-lhe que usasse ao invés da pilha, a fonte termo-elétrica descoberta por Thomas Seebeck (1770 – 1831), em 1822. Através desta, Ohm encontraria a estabilidade necessária para a realização dos seus futuros experimentos.

5. O PRINCIPAL TRABALHO DE OHM

Descrição do experimento principal

No ano de 1826, Ohm publicou dois artigos onde tratavam dos principais aspectos da sua teoria sobre a eletricidade galvânica. O primeiro deles intitulado *Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontaktelektricität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaischen Apparates und des Schweiggerschen Multiplifiers* [Determinação da lei segundo a qual os metais conduzem a eletricidade de contato, juntamente com o projeto de uma teoria do aparelho de Volta e do multiplicador de Schweigger] anunciava uma lei muito abrangente sobre a corrente elétrica, hoje considerada a base para a atual lei de Ohm.

O segundo artigo de Ohm, *Versuch einer Theorie der durch galvanische Kräfte hervorgebrachten elektroskopischen Erscheinungen* [Tentativa de uma teoria dos fenômenos eletroscópicos provocados por forças galvânicas], buscou teorizar a associação da tensão elétrica aos circuitos galvânicos abertos e fechados [3].

O procedimento experimental utilizado no primeiro artigo citado era análogo ao que foi descrito anteriormente. A principal diferença, agora, está na fonte de tensão elétrica. Neste caso, Ohm preferiu aceitar as sugestões de Pogendorff quanto à utilização da célula termoeletrica. No planejamento e na execução do seu experimento, Ohm inteligentemente combinou as descobertas contemporâneas de Oersted — o eletromagnetismo — e de Seebeck — o termomagnetismo. Então Ohm, insatisfeito com as dificuldades apresentadas pelo aparato que utilizava a pilha de Volta como fonte de eletricidade e para evitar a flutuação nos resultados experimentais que ele viria a obter, construiu então um termopar com junções de tiras de cobre atarraxadas e ligadas ao bismuto. Ohm construiu um aparato cujo conjunto está representado na Figura 10b.

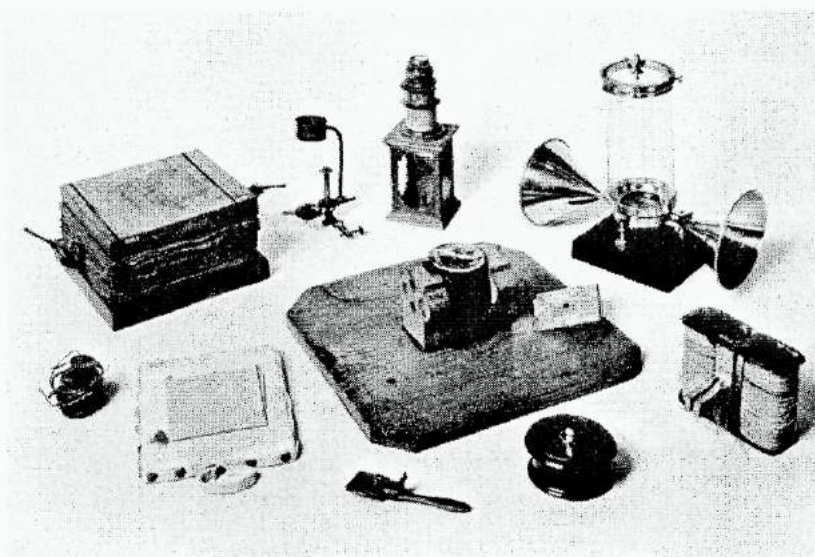


Figura 9. Algumas relíquias do aparato de Ohm. Uma pilha seca (canto superior esquerdo), um "termogalvanômetro" de junção bismuto-antimônio (canto superior direito), um galvanômetro simples (centro), suporte de couro com folhas de ouro usada em eletroscópios (canto inferior esquerdo) e um eletromagneto (canto inferior direito). (Deutsches Museum, Munich) [7].

As Figuras 11, 12, e 13 apresentam vistas diferentes do mesmo aparato. A fim de facilitar a compreensão, os desenhos foram refeitos e as nomenclaturas foram traduzidas. Entretanto, as marcações alfabéticas foram preservadas. O próprio Ohm descreveu seu aparato experimental com riqueza de detalhes. Em nossa pesquisa não encontramos referência deste detalhamento em português. Considerando a proposta deste trabalho, julgamos pertinente apresentar a nossa versão traduzida da descrição, para que o leitor possa perceber a riqueza do então inovador método e procedimento, além de admirar a genialidade do cientista em questão [22]:

Um pedaço de bismuto foi moldado no formato de uma peça retangular conforme a fig. 10 (abb'a') cujo lado media $6 \frac{1}{2}$ polegadas ($\cong 16$ cm) e cujos pés ab , $a'b'$ com $3 \frac{1}{2}$ polegadas ($\cong 9$ cm) de comprimento. Esta peça de bismuto tinha 9 linhas ($\cong 2$ cm) de largura

e 4 linhas ($\cong 1$ cm) de espessura. Em cada um dos dois pés eu fixei as duas tiras de cobre (abcd e a'b'c'd'), que mediam 9 linhas ($\cong 2$ cm) de largura, 1 linha ($\cong 0,2$ cm) de espessura e juntas somavam 28 polegadas ($\cong 70$ cm) de comprimento. As tiras estavam curvadas, de forma que seus extremos livres (cd e c'd') estavam imersos em mercúrio contido em dois recipientes — similares a xícaras — (m e m') que estavam fixos na base de madeira (fghi) do aparato.

Na parte superior da base foi colocada uma balança de torção, em cuja descrição eu serei um dos primeiros difusores, já que sua construção difere um pouco do usual. O cilindro de vidro (vv) no qual a balança está fixada, tem 6 polegadas ($\cong 15$ cm) de altura e $4\frac{1}{2}$ polegadas ($\cong 11$ cm) de largura. O bloco superior do cilindro consiste em duas partes, uma delas (nop) é formada de um soquete ligeiramente cônico e é bem fixado na parte superior do cilindro, a outra parte (qrs) com uma projeção cônica de 8 linhas ($\cong 2$ cm) de espessura ajusta-se rigorosamente ao soquete e com um prato (rr) de 3 polegadas ($\cong 8$ cm) de largura descansando sobre o prato (nn) de mesma largura. O ponto central da projeção (qs) foi marcado com grande cuidado no torno por uma leve depressão cônica, e a peça metálica foi então encaixada a meia polegada de seu comprimento até as superfícies planas, mostrando assim, a depressão cônica como um completo triângulo. Por um arranjo especial a linha pela qual a agulha está suspensa foi fixada à projeção de forma que seu ponto central está exatamente no ápice do triângulo.

A agulha magnética (tt) era feita de fio de aço 0,8 linhas ($\cong 0,17$ cm) de espessura e não chega a ter 2 polegadas ($\cong 5$ cm) de comprimento. Seus dois extremos estavam inseridos em pedaços cilíndricos de marfim, onde o fio de metal foi fixado. Em uma das extremidades a agulha foi cortada e dobrada ligeiramente para baixo, servindo como um indicador quando em movimento sobre o arco metálico (uu) que se dividia em uma escala graduada.

A agulha foi suspensa por uma tira de arame de ouro nivelado achatada de 5 polegadas ($\cong 12$ cm) de comprimento fixada exatamente ao eixo de rotação da balança de torção. As tiras metálicas levemente achatadas são em meu julgamento muito melhor ajustáveis para experimentos com a balança de torção que os fios cilíndricos. Esta tira utilizada em minha balança de torção, sem mencionar suas dimensões, o que em muitos aspectos são desejáveis e considerando um alto grau todas as exigências para investigações com a balança de torção, essa agulha, depois da tira experimentar uma tensão de mais de três revoluções completas, retoma sua antiga posição novamente assim que for liberada da tensão. Não obstante, depois de cada experiência eu examinei a agulha na posição de descanso, para me assegurar de que o aparato não tinha sofrido nenhuma mudança. Além disso, eu penso em considerar que nos experimentos realizados com uma agulha similar de metal as pequenas e grandes vibrações (eu os examinei de duas revoluções inteiras até alguns graus) acontecem exatamente ao mesmo tempo.

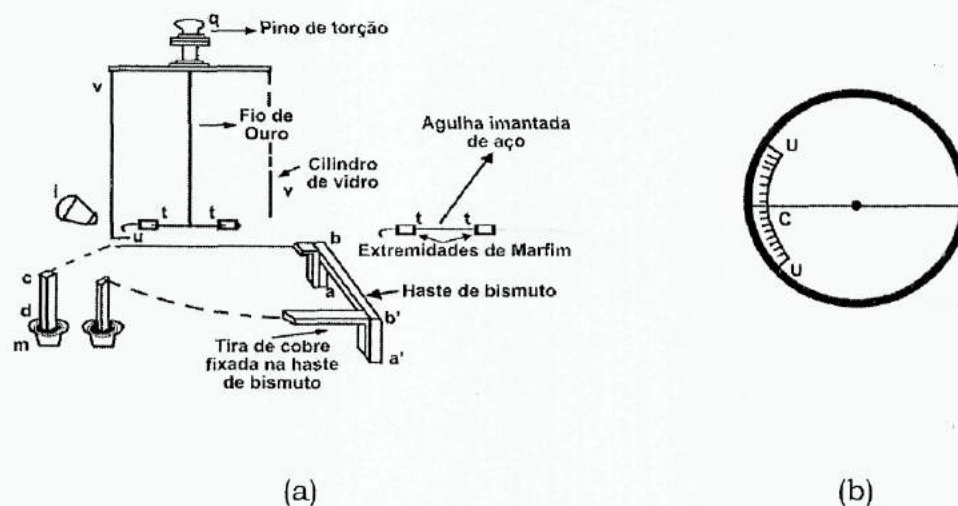


Figura 12. Aparato de Ohm em detalhes. (a) Ohm nomeia as partes do aparato. (b) Vista superior da agulha magnética posicionada no centro da escala [25].

A balança de torção esteve fixada ao prato superior da base do aparato, de tal modo que foi colocada uma linha reta na largura da tira de cobre (bc) na direção do ponto central onde se divide o arco (uu) e uma simples linha de seda colocada perpendicularmente antes do arco, juntamente com a agulha magnética, estavam no meridiano magnético quando seus ponteiros marcavam zero na escala graduada. Na projeção (k) da base do aparato estava uma lente convexa (l) de comprimento focal de uma polegada ($\cong 2,54\text{cm}$), colocada de tal forma que a escala inferior poderia ser observada e para evitar o paralax, os olhos sempre deveriam observar a coincidência da linha de seda e do ponto central da balança. As observações eram feitas da seguinte maneira: sempre que a agulha era defletida por uma corrente elétrica no aparato, a tira era torcida no sentido oposto pela parte giratória da balança até o ponteiro da agulha de metal se levantar por trás da linha de seda e se posicionar na parte central da escala; então a torção

era lida em centésimos de uma revolução na escala superior, cujo número fornecia a força que agia sobre a agulha.

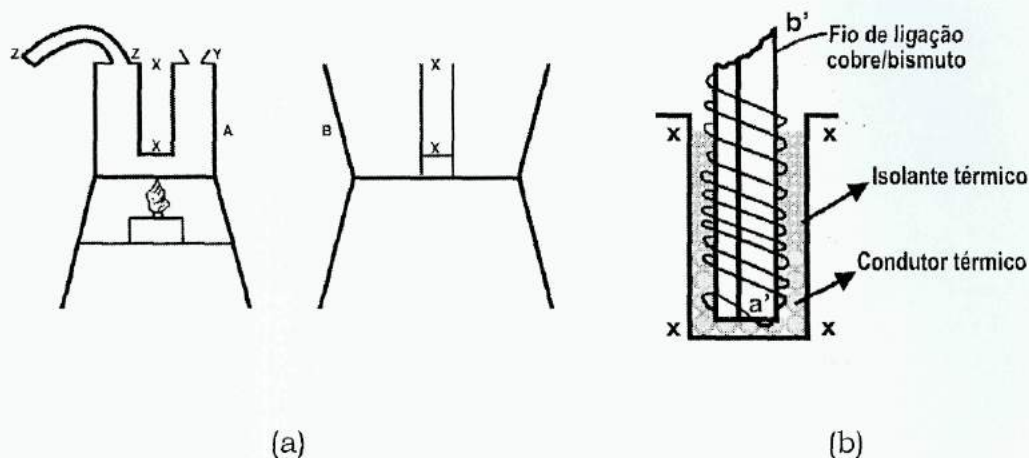


Figura 13. (a) Recipientes onde as junções eram expostas a variação de temperatura. (b) Detalhe dos recipientes que mostram a forma como Ohm fixava a junção e a isolava termicamente [25].

As extremidades dos condutores de teste utilizados nas experiências eram imersos nos recipientes de mercúrio (m e m') sobre os quais para maior segurança preparava-se um arranjo simples nos quais as extremidades dos condutores eram colocadas em contato com o mercúrio sempre da mesma maneira. Os corpos dos condutores eram revestidos de resina e ficavam levemente suspensos do recipiente. As superfícies das extremidades eram limadas e limpas e este processo seria renovado constantemente. Um contato metálico perfeito das várias partes era uma condição indispensável em pesquisas desse tipo, caso contrário estas observações poderiam não ser precisas.

Finalmente, para trazer as partes do aparato onde o bismuto e o cobre estão em contato com a diferença de temperatura apropriada, eu

O conjunto de dados obtidos por Ohm já revela uma relação de dependência entre o comprimento do fio e a força de ação magnética, que está relacionada à força mecânica empregada para retornar a agulha ao seu ponto central, cujo equivalente já poderia ser calculado.

Ohm deu uma ênfase especial ao fato de que nenhum rastro de flutuação foi detectado, como a que aparecia quando a pilha hidroelétrica — voltaica — estava no circuito. Quando a agulha era trazida para a posição de descanso, não era observado nenhum movimento. Ele observava a agulha por meia hora após uma série de experiências serem concluídas, sem perceber pequenas mudanças de posição. Ohm percebeu que as flutuações tinham relação direta com a fonte voltaica, pois a inserção dos condutores de teste afetaria na condutividade do fluido elétrico constituinte da fonte hidroelétrica. Como Ohm pretendia observar apenas a influência do metal na condução de corrente elétrica, ele concluiu que o circuito hidroelétrico não era definitivamente adequado. Desta forma, Ohm considerou que um circuito alimentado pelo efeito termoeletrico era perfeitamente apropriado para esse propósito.

Tabela 3. Resultados de Ohm referente às séries de experimentos realizadas em Janeiro de 1826.

<i>Datas</i>	<i>Séries</i>	<i>Comprimento dos condutores, em polegadas</i>							
		<i>2</i>	<i>4</i>	<i>6</i>	<i>10</i>	<i>18</i>	<i>34</i>	<i>66</i>	<i>130</i>
8 Jan	I	326 ³ / ₄	300 ³ / ₄	277 ³ / ₄	238 ¹ / ₄	190 ³ / ₄	134 ¹ / ₂	83	48 ¹ / ₂
	II	311 ¹ / ₄	287	267	230 ¹ / ₄	183 ¹ / ₂	129 ¹ / ₄	80	46
11 Jan	III	307	284	263 ³ / ₄	226 ¹ / ₄	181	128 ³ / ₄	79	44 ¹ / ₂
	IV	305 ¹ / ₄	281 ¹ / ₂	259	224	178 ¹ / ₂	124 ³ / ₄	79	44 ¹ / ₂
15 jan	V	305	282	258 ¹ / ₄	223 ¹ / ₂	178	124 ³ / ₄	78	44

A Figura 13 mostra uma página original do registro de laboratório datado de 8 de Janeiro de 1826. Nesta página, podem-se observar importantes características deste conjunto de dados; os oito condutores de teste são do mesmo material, diferenciando apenas nos seus comprimentos; o ponto de repouso do condutor “o” é omitido; e a deflexão da agulha, medida pelo seu giro no círculo graduado, é

preparei dois recipientes cujas representações de suas seções transversais estão em uma escala maior na fig. 12(a). Cada uma delas possui uma cavidade na parte central (xx), que irá receber os pés da junção cobre/bismuto (ab e a'b'). No recipiente A, foi adicionada água fervendo; em (y) tem-se um orifício que poderia ser fechado com cortiça e pelo qual poderia ser introduzida água no recipiente, e do outro lado um tubo (zz) destinado ao escape do vapor. No recipiente B foi adicionado neve ou pedaços de gelo quebrados. Em uso, cada junção termopar era encaixada em uma cavidade (xx) de acordo com a maneira mostrada na fig. 12(b). Os pequenos flocos de chumbo garantiam um bom contato térmico entre as junções e as cavidades. Uma espécie de lã de vidro foi utilizada como isolante térmico para evitar troca de calor com o ar da vizinhança.

O procedimento e os resultados de Ohm.

O procedimento utilizado por Ohm em seu experimento tinha como finalidade analisar o comportamento de duas grandezas: o comprimento dos condutores de teste (x), a variável independente, e da força (torção) necessária para trazer a agulha magnética ao ponto central da escala inferior após a deflexão, ou seja, a deflexão da agulha, (X), a variável dependente, medida a partir da escala superior da balança de torção.

Inicialmente Ohm preparou oito diferentes condutores, aos quais ele se refere como 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, que medem respectivamente 2, 4, 6, 10, 18, 34, 66, 130 polegadas (\cong 5, 10, 15, 25, 46, 86, 168, 330 cm) de comprimento e 7/8 linhas (\cong 0,18 cm) de espessura cortados de uma espécie de fio banhado a cobre.

Depois de a água ter sido fervida por meia hora e os pedaços de gelo quebrados e inseridos no recipiente, estes fios foram conectados ao circuito um de cada vez. Desta forma variava os fios de cobre e media os deslocamentos necessários para retornar, em cada caso, a agulha para o ponto central.

Entre quaisquer duas séries de experiências que duravam de três a quatro horas havia sempre uma pausa de uma hora, enquanto a água voltava a ferver, e então os condutores eram novamente conectados em série no circuito, mas na ordem oposta. Ele então obteve os seguintes resultados, representados na Tabela 3.

6. ANALISANDO OS RESULTADOS DE OHM

Interpretação dos dados de Ohm através de gráficos.

A esta altura do desenvolvimento do trabalho, certamente nos ocorreu uma pergunta: como Ohm concluíra que a equação (9) descreveria o comportamento das grandezas em questão? E ainda, como haveria estipulado valores para as constantes a e b , com o intuito de comprovar sua idéia de que seus dados se ajustavam a equação? Infelizmente não encontramos respostas durante nossas pesquisas, sobre como Ohm haveria incorporado essa equação aos seus resultados experimentais. Até porque, seu trabalho teórico foi publicado somente em 1827, enquanto os resultados desse experimento foram divulgados no seu primeiro artigo ainda no ano de 1826.

Neste contexto de incertezas buscamos trabalhar com os dados de Ohm através do método gráfico, ferramenta essencial na atividade científica. Nosso objetivo agora é determinar a relação algébrica mais simples possível entre as variáveis estudadas por Ohm, o comprimento do condutor x e a deflexão da agulha magnética X , a partir somente da análise das observações experimentais.

Nossa primeira tentativa, naturalmente, é relacionar diretamente as grandezas consideradas, construindo um gráfico da deflexão (X) em função do comprimento do condutor (x) com os dados das séries experimentais de Ohm da Tabela 3. Escolhemos para confeccionar o primeiro gráfico, os dados da Série I, obtida no dia 8 de janeiro de 1826. Desta forma poderemos comparar os diferentes resultados obtidos para o mesmo conjunto de dados.

A curva encontrada com os dados de Ohm através do gráfico da Figura 15a representa uma relação não linear entre a deflexão da agulha e o comprimento do fio. Observamos ainda a partir do mesmo gráfico que quanto maior é o comprimento do fio (x), menor é a deflexão (X).

Este comportamento nos sugere então confrontar o produto destas duas grandezas ($X.x$) em função de uma delas — o comprimento x do fio, por exemplo. Podemos observar o resultado de tal comparação no gráfico ilustrado na Figura 15b, na página a seguir.

considerado como a medida da intensidade do fluxo elétrico. Quase no fim da página ele indica que o efeito da corrente observado no circuito "hidroelétrico", neste caso, esteve completamente ausente, como já observamos anteriormente.

Durante os dias subseqüentes, o experimento foi repetido várias vezes com Ohm tentando minimizar toda variável inaplicável como o desvio de temperatura da junção metálica e a resistência de contato — sendo o último o mais importante por causa da baixa resistência da nova fonte. A uniformidade dos resultados obtidos, dia após dia, impressionou Ohm; e ele começou a procurar uma expressão que representasse essa regularidade nos seus dados experimentais, reconhecendo então, que sua fórmula logarítmica não se ajustaria aos dados.

Ohm concluiu que os números encontrados nas séries de experiências descritas anteriormente poderiam ser representados satisfatoriamente pela equação:

$$X = \frac{a}{b + x}, \quad (9)$$

na qual X representa a força da ação magnética, medida pela deflexão da agulha quando o condutor utilizado tem comprimento x . Os termos a e b são constantes dependentes da força de excitação e da resistência — ou condutividade — do resto do circuito. A partir desta equação ele conseguiu determinar por cálculo, ao assumir, por exemplo, b igual a $20 \frac{1}{4}$ e a em diferentes valores iguais a 7285, 6965, 6885, 6800, 6800, respectivamente nas diferentes séries, chegando aos seguintes resultados, representados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados de Ohm obtidos através da equação (9).

<i>Exp</i>	<i>Comprimento dos condutores, em polegadas</i>							
	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>6</i>	<i>10</i>	<i>18</i>	<i>34</i>	<i>66</i>	<i>130</i>
I	328	300½	277½	240¾	190	134	84¼	48
II	313	287¼	265½	230¼	182	128½	80¾	46½
III	309½	284	262½	228	180	127	79¾	45¾
IV	305½	280½	259	224	177¾	125¼	79	45
V	305½	280½	259	224	177¾	125¼	79	45

Novamente observamos uma não linearidade com os dados apresentados neste gráfico. Neste caso, ainda não é possível definir qual é a relação algébrica mais simples para estabelecer uma relação entre as grandezas e precisamos continuar a investigação, estudando agora o comportamento do produto $X \cdot x$ pela então “força” da deflexão da agulha magnética X . Este comportamento está representado no gráfico da Figura 16.

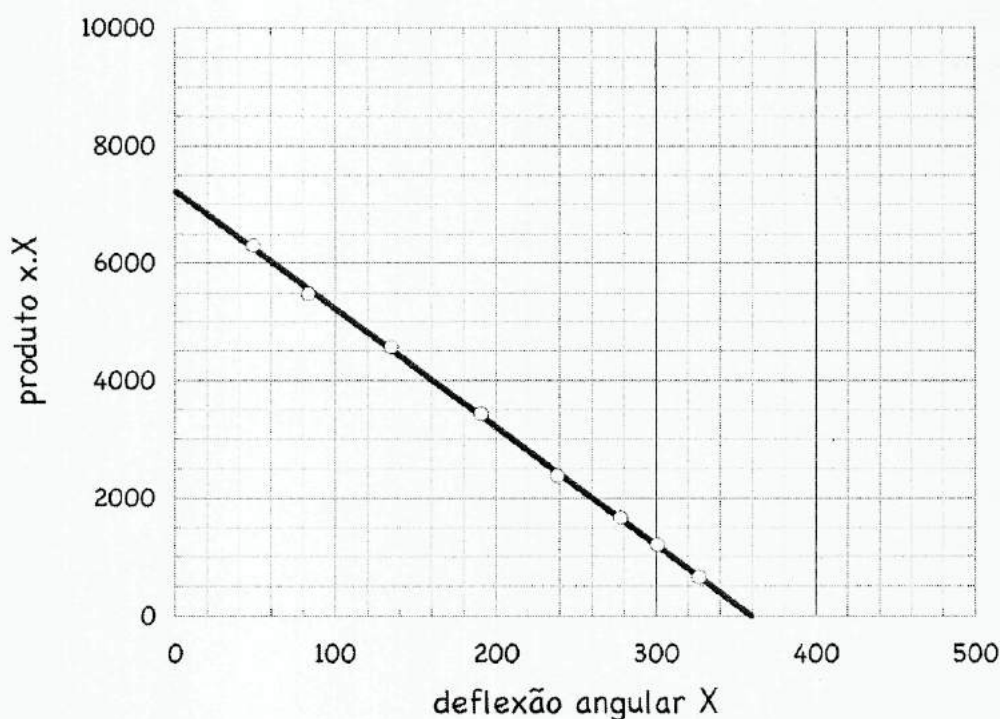


Figura 16. Terceira etapa para um ajuste dos dados da Série I dos experimentos de 8 de janeiro de 1826.

Observamos, neste último gráfico, que os dados se ajustam de forma linear. Empregando o método dos mínimos quadrados, ajustamos a melhor reta, a fim de encontrarmos o coeficiente linear e o angular com maior precisão. A reta ajustada é descrita pela equação $y = a - b \cdot x$. Os valores dos coeficientes linear e angular

Ohm comparou as duas tabelas e percebeu que não havia diferenças significativas. Compare nas Tabelas 3 e 4 os resultados referentes à Série V dos experimentos realizados em Janeiro de 1826. Nesta comparação percebemos que os valores encontrados para a "força magnética" calculada se ajustam quase que perfeitamente aos valores medidos nas experiências de Ohm.

Experimentos subsequêntes utilizando o mesmo aparato, mas com uma junção termopar mantida a temperatura ambiente, convenceram Ohm de que "a equação parecia satisfazer a qualquer valor de força excitante" e que o parâmetro a variava somente com a força excitante; enquanto o parâmetro b mantinha-se absolutamente constante, sendo dependente somente da parte invariável do circuito.

Tabela 5. Ajuste das curvas características de Ohm.

<i>Série</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	χ^2	<i>r</i>
I	(7240 ± 40)	(20,1 ± 0,2)	17210	0,9997
II	(6930 ± 40)	(20,1 ± 0,2)	14261	0,9994
III	(6790 ± 70)	(19,9 ± 0,3)	47303	0,9979
IV	(6740 ± 30)	(20,0 ± 0,2)	10282	0,9996
V	(6660 ± 40)	(19,7 ± 0,2)	13273	0,9994

Para uma discussão em sala de aula é suficiente calcular a inclinação da reta da forma usual, por inspeção. Para a *Série I* a reta corta o eixo das ordenadas aproximadamente em $a = 7250 \pm 100$ e para o coeficiente angular podemos calcular:

$$b = \frac{(6000 \pm 100) - (2000 \pm 100)}{(260 \pm 10) - (60 \pm 10)} = \frac{4000 \pm 200}{200 \pm 20} = 20 \pm 3. \quad (10)$$

Para as *Séries II, III, IV e V* temos, por comparação, essencialmente o mesmo coeficiente angular que na *Série I*, dentro da margem de incerteza, e os coeficientes lineares apresentam os seguintes valores:

$$a = 7000 \pm 100, 7000 \pm 100, 6800 \pm 100, 6800 \pm 100. \quad (11)$$

Comparando os valores de a e b obtidos através do ajuste linear por mínimos quadrados àqueles fixados⁶ por Ohm, apresentados na Tabela 6, podemos imaginar que muito provavelmente Ohm obteve a sua equação a partir de uma análise similar.

Observamos também a falta de indicação de incertezas sobre os resultados obtidos por ele o que sugere que ele tinha grande confiança nos seus resultados! Finalmente, uma vez convencidos da relação linear apresentada no gráfico da Figura 17, podemos escrever que:

$$X \cdot x = a - b \cdot X \quad (12)$$

⁶ Dizemos que os valores foram fixados, pois não encontramos uma referência que revelasse a forma como Ohm definiu os valores das constantes a e b .

Tabela 5. Ajuste das curvas características de Ohm.

<i>Série</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	χ^2	<i>r</i>
I	(7240 ± 40)	(20,1 ± 0,2)	17210	0,9997
II	(6930 ± 40)	(20,1 ± 0,2)	14261	0,9994
III	(6790 ± 70)	(19,9 ± 0,3)	47303	0,9979
IV	(6740 ± 30)	(20,0 ± 0,2)	10282	0,9996
V	(6660 ± 40)	(19,7 ± 0,2)	13273	0,9994

Para uma discussão em sala de aula é suficiente calcular a inclinação da reta da forma usual, por inspeção. Para a *Série I* a reta corta o eixo das ordenadas aproximadamente em $a = 7250 \pm 100$ e para o coeficiente angular podemos calcular:

$$b = \frac{(6000 \pm 100) - (2000 \pm 100)}{(260 \pm 10) - (60 \pm 10)} = \frac{4000 \pm 200}{200 \pm 20} = 20 \pm 3. \quad (10)$$

Para as *Séries II, III, IV e V* temos, por comparação, essencialmente o mesmo coeficiente angular que na *Série I*, dentro da margem de incerteza, e os coeficientes lineares apresentam os seguintes valores:

$$a = 7000 \pm 100, 7000 \pm 100, 6800 \pm 100, 6800 \pm 100. \quad (11)$$

Comparando os valores de a e b obtidos através do ajuste linear por mínimos quadrados àqueles fixados⁶ por Ohm, apresentados na Tabela 6, podemos imaginar que muito provavelmente Ohm obteve a sua equação a partir de uma análise similar.

Observamos também a falta de indicação de incertezas sobre os resultados obtidos por ele o que sugere que ele tinha grande confiança nos seus resultados! Finalmente, uma vez convencidos da relação linear apresentada no gráfico da Figura 17, podemos escrever que:

$$X \cdot x = a - b \cdot X \quad (12)$$

⁶ Dizemos que os valores foram fixados, pois não encontramos uma referência que revelasse a forma como Ohm definiu os valores das constantes a e b .

Da experiência à formulação teórica de Ohm.

Após os resultados obtidos com o experimento, Ohm resolveu ir mais longe e, como bom físico que era, tentou mostrar como a lei poderia ser deduzida teoricamente. Para isso ele pediu uma licença de seu trabalho como professor para se dedicar exclusivamente a sua teoria da condução de eletricidade. O segundo artigo importante de Ohm, já mencionado aqui, publicado ainda em 1826, vislumbrava o início da teoria da eletricidade galvânica, baseada no fato de que o contato de corpos heterogêneos — a fonte termoeletrica — produzia e mantinha uma “força eletroscópica” constante. Somente em 1827, a teoria elétrica apareceu publicada em seu texto clássico *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet* (O circuito galvânico, matematicamente elaborado). Neste trabalho, essencialmente teórico, ele tenta explicar os fenômenos de condução elétrica baseada em três leis fundamentais.

A primeira lei expressa como a eletricidade é distribuída dentro dos materiais. Neste postulado Ohm supôs que a eletricidade passava somente de partícula para partícula de forma direta. Dessa primeira lei podemos captar a analogia utilizada por Ohm para descrever os fenômenos elétricos a partir dos fenômenos térmicos. Ohm estruturou toda sua teoria se baseando conscientemente na *Théorie analytique de la chaleur* [Teoria analítica do calor] de Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), um fato que pode tê-lo conduzido a seguir uma linha puramente teórica, deixando o trabalho experimental, de certa forma, em segundo plano. Apesar deste fato, acredita-se que a pilha termoeletrica de Seebeck, utilizada em seus experimentos, tenha exercido forte influência na relação que ele tentou estabelecer entre os fenômenos elétricos e térmicos [26].

A segunda lei trata da dispersão da eletricidade na atmosfera. Aqui o trabalho de Coulomb foi usado, mostrando que a perda de eletricidade dentro da atmosfera por segundo é proporcional a força elétrica e que existe um coeficiente dependente da atmosfera. Ohm percebeu, porém, que esta lei “dispersiva” não seria realmente aplicável para a eletricidade galvânica, já que ele havia assumido que a passagem de eletricidade acontecia completamente dentro do corpo.

A terceira lei — a mais importante — ocupava-se da forma como a eletricidade surgia no lugar onde havia o contato de dois metais diferentes. Aqui ele escreveu [7]:

“Quando corpos diferentes se tocam, eles mantêm constante no ponto de contato a mesma diferença de potencial (ou força eletroscópica).”

Tabela 5. Ajuste das curvas características de Ohm.

<i>Série</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	χ^2	<i>r</i>
I	(7240 ± 40)	(20,1 ± 0,2)	17210	0,9997
II	(6930 ± 40)	(20,1 ± 0,2)	14261	0,9994
III	(6790 ± 70)	(19,9 ± 0,3)	47303	0,9979
IV	(6740 ± 30)	(20,0 ± 0,2)	10282	0,9996
V	(6660 ± 40)	(19,7 ± 0,2)	13273	0,9994

Para uma discussão em sala de aula é suficiente calcular a inclinação da reta da forma usual, por inspeção. Para a *Série I* a reta corta o eixo das ordenadas aproximadamente em $a = 7250 \pm 100$ e para o coeficiente angular podemos calcular:

$$b = \frac{(6000 \pm 100) - (2000 \pm 100)}{(260 \pm 10) - (60 \pm 10)} = \frac{4000 \pm 200}{200 \pm 20} = 20 \pm 3. \quad (10)$$

Para as *Séries II, III, IV e V* temos, por comparação, essencialmente o mesmo coeficiente angular que na *Série I*, dentro da margem de incerteza, e os coeficientes lineares apresentam os seguintes valores:

$$a = 7000 \pm 100, 7000 \pm 100, 6800 \pm 100, 6800 \pm 100. \quad (11)$$

Comparando os valores de a e b obtidos através do ajuste linear por mínimos quadrados àqueles fixados⁶ por Ohm, apresentados na Tabela 6, podemos imaginar que muito provavelmente Ohm obteve a sua equação a partir de uma análise similar.

Observamos também a falta de indicação de incertezas sobre os resultados obtidos por ele o que sugere que ele tinha grande confiança nos seus resultados! Finalmente, uma vez convencidos da relação linear apresentada no gráfico da Figura 17, podemos escrever que:

$$X \cdot x = a - b \cdot X \quad (12)$$

⁶ Dizemos que os valores foram fixados, pois não encontramos uma referência que revelasse a forma como Ohm definiu os valores das constantes a e b .

Da experiência à formulação teórica de Ohm.

Após os resultados obtidos com o experimento, Ohm resolveu ir mais longe e, como bom físico que era, tentou mostrar como a lei poderia ser deduzida teoricamente. Para isso ele pediu uma licença de seu trabalho como professor para se dedicar exclusivamente a sua teoria da condução de eletricidade. O segundo artigo importante de Ohm, já mencionado aqui, publicado ainda em 1826, vislumbrava o início da teoria da eletricidade galvânica, baseada no fato de que o contato de corpos heterogêneos — a fonte termoeletrica — produzia e mantinha uma “força eletroscópica” constante. Somente em 1827, a teoria elétrica apareceu publicada em seu texto clássico *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet* (O circuito galvânico, matematicamente elaborado). Neste trabalho, essencialmente teórico, ele tenta explicar os fenômenos de condução elétrica baseada em três leis fundamentais.

A primeira lei expressa como a eletricidade é distribuída dentro dos materiais. Neste postulado Ohm supôs que a eletricidade passava somente de partícula para partícula de forma direta. Dessa primeira lei podemos captar a analogia utilizada por Ohm para descrever os fenômenos elétricos a partir dos fenômenos térmicos. Ohm estruturou toda sua teoria se baseando conscientemente na *Théorie analytique de la chaleur* [Teoria analítica do calor] de Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), um fato que pode tê-lo conduzido a seguir uma linha puramente teórica, deixando o trabalho experimental, de certa forma, em segundo plano. Apesar deste fato, acredita-se que a pilha termoeletrica de Seebeck, utilizada em seus experimentos, tenha exercido forte influência na relação que ele tentou estabelecer entre os fenômenos elétricos e térmicos [26].

A segunda lei trata da dispersão da eletricidade na atmosfera. Aqui o trabalho de Coulomb foi usado, mostrando que a perda de eletricidade dentro da atmosfera por segundo é proporcional a força elétrica e que existe um coeficiente dependente da atmosfera. Ohm percebeu, porém, que esta lei “dispersiva” não seria realmente aplicável para a eletricidade galvânica, já que ele havia assumido que a passagem de eletricidade acontecia completamente dentro do corpo.

A terceira lei — a mais importante — ocupava-se da forma como a eletricidade surgia no lugar onde havia o contato de dois metais diferentes. Aqui ele escreveu [7]:

“Quando corpos diferentes se tocam, eles mantêm constante no ponto de contato a mesma diferença de potencial (ou força eletroscópica).”

Anos mais tarde, James Clerk Maxwell (1831-1879) provou que Ohm estava errado em alguns aspectos com relação a sua teoria, ele teria dito sobre o engano [26]:

“Ohm, enganado pela analogia entre eletricidade e calor, se contentou com a opinião de que um corpo submetido a um potencial alto é eletrificado ao logo de sua substância, como se a eletricidade estivesse comprimida dentro dele, e foi assim através de uma opinião errônea, que ele empregou as equações de Fourier a fim de expressar as verdadeiras leis de condução de eletricidade por um fio longo, muito antes do motivo real para adequação destas equações serem julgadas.”

Em outras palavras, Ohm acreditava que o condutor pudesse “reter” eletricidade, da mesma forma que algumas substâncias retêm o calor. Maxwell mostra a partir de um contexto onde o condutor está envolvido por um material isolante — um dielétrico — que somente estes materiais teriam a propriedade de “reter” alguma quantidade de eletricidade na sua forma estática, e que o fluxo (corrente) elétrico seria incompressível em metais condutores comuns.

Neste momento, entretanto, estamos buscando desvendar como surgiu a conhecida relação entre resistência, corrente elétrica e diferença de potencial elétrico. Não é nosso objetivo detalhar o trabalho teórico de Ohm, mas gostaríamos de apresentar duas equações importantes para a fundamentação da sua lei.

O caso especial no trabalho de Ohm trata de um condutor longo de seção transversal uniforme que é submetido a uma única fonte de tensão [27]. Ele expressou a magnitude do fluxo de eletricidade (corrente), S , como:

$$S = \omega \cdot k \left(\frac{du}{dx} \right). \quad (16)$$

Onde ω representa a área da seção transversal do condutor, k é a condutividade elétrica (comprimento do condutor), u é a força eletroscópica (desvio da agulha) em algum ponto x do condutor.

No decorrer de seus cálculos, Ohm apresentou uma generalização para a determinação da força eletroscópica no caso de circuitos compostos de qualquer número de diferentes condutores e fontes de força eletromotriz, que resulta em:

$$u = \left(\frac{A}{L} \right) y - O + c. \quad (17)$$

Onde A é a soma das tensões de todas as fontes de força eletromotriz, L é o comprimento reduzido total do circuito, y é o comprimento reduzido da porção do circuito entre a origem e um determinado ponto do circuito, c uma constante a ser determinada toda vez que se conhece o valor da força eletroscópica e O é a soma das tensões de todas as fontes localizadas entre a origem e o ponto escolhido.

Conhecendo as equações (19) e (20), podemos deduzir:

$$S = \omega \cdot k \cdot \frac{du}{dy} \cdot \frac{dy}{dx} = \omega \cdot k \cdot \frac{A}{L} \cdot \frac{dy}{dx}. \quad (18)$$

Ohm demonstrou ao derivar a equação (17), que dy/dx (relação entre a variação do comprimento reduzido e do comprimento real do condutor) é igual a $1/(k \cdot \omega)$. Logo,

$$S = \frac{A}{L}. \quad (19)$$

De acordo com os experimentos e formulação teórica de suas investigações, Ohm chegou a duas conclusões importantes ao concluir seu trabalho teórico [7]:

- O fluxo (corrente) elétrico é igual força em todos os lugares de um circuito, e é independente da intensidade da força eletroscópica em um determinado lugar. Em um circuito aberto o fluxo cessa completamente, para o caso de reduzirmos o comprimento do fio, ele adquire um grande valor;
- A força do fluxo elétrico num circuito voltaico permanece invariável quando a soma de todas suas tensões e a redução de seu comprimento não é variada ou variam na mesma proporção.

A lei de Ohm como a conhecemos hoje.

Obviamente, Ohm não comparou de imediato as variáveis e constantes da sua equação $X = a/(b + x)$, com a relação $I = V/(r + R)$ que conhecemos hoje. Acredita-se que Ohm não teve nenhuma idéia mais precisa do conceito de resistência que a maioria seu contemporâneos, embora ele aparente ter entendido perfeitamente as relações entre as variáveis do circuito. Ao final de suas investigações, Ohm havia concluído que o fluxo elétrico no circuito galvânico é diretamente proporcional à diferença de potencial entre os extremos do circuito, a seção transversal do condutor e a condutividade específica do material pela qual a eletricidade viaja; e é inversamente proporcional ao comprimento do fio.

Foram transcorridos mais de 30 anos após a publicação de seu trabalho, para que a identificação conceitual e conversão dos termos da lei de Ohm se transformassem nos termos atuais que conhecemos. Durante esses anos, os físicos desenvolveram e acumularam conhecimentos sobre os fenômenos elétricos.

Em meados do século dezessete, Newton, trabalhando nas aplicações das leis dinâmicas, obteve avanços importantes na teoria das equações diferenciais. Começando com alguma especial formulação das leis de Newton — como o princípio de Lagrange da menor ação ou a conservação de energia mecânica de Bernoulli — os teóricos deduziram as “vastas superestruturas de fórmulas”, e reduziram todo problema para uma equação diferencial. Eles produziram teorias de velocidade-campo para fluidos, e outra teoria de campo para gravitação da qual era um tipo logicamente diferente de uma teoria de velocidade-campo. Na teoria de campo a variável importante, a velocidade, é uma real propriedade de um fluido para todos os pontos dentro desse campo. Na teoria gravitacional, porém, uma variável V foi caracterizada como “potencial” no sentido de que isto não necessariamente descreveria uma propriedade material do campo, porque isto pode ter um valor no espaço vazio. [6]

No início do século dezanove Poisson introduziu uma função como V dentro da eletrostática. Cavendish foi pioneiro no estudo do “grau de eletrificação” dos condutores. O que Poisson fez foi estabelecer um link entre o grau de eletrificação de Cavendish, que nós mais tarde denominamos de potencial, e a função V de Lagrange e Laplace.

Antes de 1828, George Green tinha dado o nome “função potencial” à quantidade V que Poisson, Lagrange e Laplace tinham escolhido, no contexto

elétrico, para ser igual ao *somatório de todas as cargas elétricas dividido pelas respectivas distâncias*, para qualquer ponto no campo. Isto, obviamente, é o significado atual de potencial num ponto; mas na época em que Green tinha então expressado isto, Ohm já tinha levado a análise de Fourier do fluxo de calor como o modelo para sua própria teoria sobre a lei da corrente em um circuito, como citamos anteriormente. Claramente, Ohm considerou sua “força eletroscópica” como sendo a causa do movimento do fluido elétrico, fazendo uma natural associação para a diferença de temperatura no calor. Kirchoff, em 1845, concluiu que a *diferença de potencial* de Green e a *força eletroscópica* de Ohm eram uma e a mesma. Isto foi também Kirchoff que mostrou em 1859 — cinco anos depois da morte de Ohm — que se a variável “a” derivada da equação do experimento de Ohm representasse a diferença de potencial de Green, então poderia se estabelecer uma completa consistência entre a teoria da eletricidade e eletrostática. Somente com a demonstração dessa consistência podemos escrever $X = a/(b + x)$ na forma algébrica que utilizamos hoje $I = V/(r + R)$, sem perder o significado que havia sido anexado às grandezas. [6]

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observando a trajetória deste homem, juntamente com seus contemporâneos, percebemos a importância de suas contribuições no que tange ao desenvolvimento e descrição dos fenômenos eletromagnéticos. E nos dias de hoje, tendo em vista a velocidade com a qual esses e outros campos da física vêm se desenvolvendo, aumentando cada vez mais o volume de informações relativas à compreensão do mundo que nos cerca, se torna clara a necessidade da simplificação dos conceitos visando à divulgação científica, que no nosso caso, realiza-se nas salas de aulas, com os alunos do nível médio.

O que não deve ser perdido de vista são a beleza e a importância do processo de construção desse conhecimento científico, que ocorre através de pessoas que buscam a pesquisa, a reflexão, a abstração e a criação. Georg Simon Ohm foi um dessas pessoas que dedicou a sua vida na procura do que acreditava ser a verdade sobre a natureza.

Este trabalho buscou agregar informações pertinentes sobre a história da descoberta da “lei de Ohm”, passando pela biografia de Ohm e suas motivações científicas, pela influência em seu trabalho do contexto econômico e do desenvolvimento tecnológico aliado ao conhecimento científico teórico no século XIX, pelas contribuições dos trabalhos dos contemporâneos de Ohm e finalizando com a apresentação e descrição de seus dois experimentos e principais trabalhos.

O nosso olhar acerca dos resultados experimentais de Ohm apresenta uma maneira alternativa de se contemplar esse tema. O método gráfico apresentado neste trabalho, visando a compreensão da relação entre as grandezas, pode proporcionar novas formas de contextualizar a história da descoberta da lei de Ohm e aproximar os alunos do trabalho deste cientista, fugindo das tradicionais formas de verificação desta “lei”, como já citamos no início deste trabalho.

A importância deste trabalho no contexto educacional reside na composição de um material instrucional histórico para os professores, que a partir dele, serão capazes de planejar aulas temáticas utilizando com mais facilidade o enfoque da História da Ciência. Esse trabalho traz informações sobre a lei de Ohm que muitos

professores ensinam e os alunos por sua vez, aprendem e utilizam, mas que, de fato, se pudermos colocá-la sob uma perspectiva histórica, poderemos aprender um pouco mais sobre o método científico, indo além da apresentação da simples relação $I = V / (r + R)$.

Buscar as respostas para perguntas referentes à descoberta da lei de Ohm, só foi possível conhecendo um pouco mais da história de seu grande personagem Georg Simon Ohm. Sua trajetória como um pesquisador solitário em busca da verdade sobre a natureza que acreditava existir, aliada a um contexto social onde a necessidade de expansão da rede telegráfica motivara a pesquisa sobre a propriedade dos condutores elétricos, resultou na descoberta que atualmente descreve os princípios básicos de funcionamento dos equipamentos elétricos e eletrônicos cujo comportamento é considerado ôhmico.

REFERÊNCIAS

- [1] Alvarenga, Beatriz e Máximo, Antônio, *Física Volume Único*, Scipione, 1ª Ed., São Paulo, 1997, p. 426.
- Alvarenga, Beatriz e Máximo, Antônio, *Curso de Física*, Scipione, vol. 3, 5ª Ed., São Paulo, 2000, p. 137 e 188.
- Alvarenga, Beatriz e Máximo, Antônio, *Física, de olho no mundo do trabalho*, Scipione, volume único, 1ª Ed., São Paulo, p. 212 e 229.
- Bonjorno, José R. e Márcico, Clinton R., *Temas de Física*, FTD, vol.3, São Paulo, 1997, p. 123 e 185.
- Bonjorno, José R. e Márcico, Clinton R., *Física, História e Cotidiano*, FTD, volume único, São Paulo, 2004, p. 528 e 558.
- Bonjorno, José R. e Márcico, Clinton R., *Física Novo Fundamental*, FTD, volume único, São Paulo, 1999, p. 499 e 537.
- Gaspar, Alberto, *Física*, São Paulo, Ática, 1ª Ed., volume único, São Paulo, 2001, p. 398 e 409.
- Gaspar, Alberto, *Física — Eletromagnetismo e Física Moderna*, Ática, 1ª Ed., vol.3, São Paulo, p. 116 e 143.
- Anjos, Ivan G., *Física Coleção Horizontes*, IBEP, volume único, São Paulo, p. 296 e 314.
- Gualter, José B., Boas, Newton V. e Helou, Ricardo, *Tópicos de Física*, Saraiva, 15ª Ed. vol. 3, São Paulo, 2001, p. 142 e 222.
- Boa, Marcelo F. e Guimarães, Luiz A., *Ensino Médio: Física — Eletricidade e Ondas*, Futura, vol.3, Niterói, 2001, p. 49 e 71.
- Ramalho, Francisco, Ferraro, Nicolau G. e Soares, Paulo A. T., *Os fundamentos da física*, Moderna, 7ª Ed. vol.3, Rio de Janeiro, p. 136 e 216.
- Chaves, Alaor S., *Física Eletromagnetismo*, Reichmann & Affonso Editores, 1ª Ed., vol. 2, Rio de Janeiro, 2001, p. 82.

- GRES, *Física 3: Eletromagnetismo*, Editora USP, São Paulo, 1993, p. 62.
- Tipler, Paul, A. *Física: eletricidade, magnetismo e ótica*, LTC, 4^a Ed., Rio de Janeiro, 2000, p. 122 e 126.
- Gonçalves, Dalton, *Física: volume zero*, Ao livro técnico S/A, 3^a Reimpressão, 1^a Ed., Rio de Janeiro, 1978, p. 255 e 280.
- Paraná, Djalma N. S., *Física Eletricidade*, Ática, 7^a Ed., vol. 3, São Paulo, 1999, p. 125 e 198.
- [2] Gillespie, Charles C., *Dictionary of Scientific Biography*, Charles Scribner's Sons, New York, vol. 9, 1980, p. 182-193 (Ohm), vol. 11, p. 281 (Seebeck).
- [3] Gillespie, Charles C., *Dicionário de Biografias científicas*, tradução: Carlos Almeida Pereira, Contraponto, Rio de Janeiro, 2007, vol. xx (Ohm), vol. 3 (Oersted), vol. 3 (Volta), vol. 1 (Coulomb).
- [4] Brasil, Secretaria de Educação Fundamental, *Parâmetros curriculares nacionais*, MEC/SEF. Brasília, 1998.
- Brasil, Ministério da educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros curriculares nacionais — Ensino Médio*, MEC/SEF. Brasília, 2000.
- Brasil, Ministério da educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *PCN+ Física: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais; ciências da natureza, matemática e suas tecnologias*. MEC/SEMTEC, Brasília, 2002.
- Brasil, Ministério da educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *PCN+ Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais; ciências da natureza, matemática e suas tecnologias*. MEC/SEMTEC, Brasília, 2002.
- [5] Peduzzi, Luiz O. Q. "Sobre a utilização didática da História da Ciência", in: Maurício Piatrecola (org), *Ensino de Física (conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora)*, Editora da UFSC, Florianópolis, 2002, p. 151-170.
- [6] Davies, B. "Historical cases studies No. 2: A web of naked fancies?", *Physics Education*, 15, 1 (1980) 57-61.
- [7] Gee, B. "Names in Physics: Georg Simon Ohm", *Physics Education*, 4, 2 (1969) 106-13.

- [8] Thuillier, Pierre "O contexto cultural da ciência", *Ciência Hoje*, 9, 50 (1989) 18-23.
- [9] Villas-Bôas, Ana L. "O Pensamento Científico-Tecnológico no contexto de formação e desenvolvimento do capitalismo até o século XIX", *Revista da SBHC*, 15 (1996) 3-10.
- [10] Resumo da história da telegrafia. Acesso em Julho de 2009.
http://www.del.ufms.br/PCI_T1/G9/TrabalhoTelegrafo/TelegrafoIndexMurilo.htm;
<http://br.geocities.com/jcc500rpt/museutelegrafo.htm>;
<http://www.dw-world.de/dw/article/0,,526221,00.html>
- [11] Telégrafo de Morse. Imagens em linha. Acesso em Setembro de 2009. Disponível em
<http://usuarios.lycos.es/reglamento/ESQUEMA.JPG>
<http://www.redeuniao.com.br/blogdauniao/wp-content/uploads/2009/05/telegrafo-morse.jpg>
- [12] Schwartz, Joseph and McGuinness, Michael, "Einstein for beginners", British Library, Icon Books, Cambridge, 1992.
- [13] Silva, Mauro C. e Moreira, Ildeu C., "A introdução da telegrafia elétrica no Brasil", *Revista da SBHC*, 5, 1 (2007) 47-62.
- [14] Martinez, Alberto A., "Replication of Coulomb's Torsion Balance Experiment", *Archives for History of Exact Sciences*, 60 (2006) 517-563.
https://webpace.utexas.edu/aam829/1/m/Coulomb_files/CoulombExperiment-1.pdf
- [15] Balança de torção de Coulomb. Imagens em linha. Acesso em Setembro de 2009. Disponível em
http://www.feiradeciencias.com.br/sala11/image11/11_T00a_02.gif
- [16] Experimento de Oersted. Imagens em linha. Acesso em Setembro de 2009. Disponível em
http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102-474420020004000016&script=sci_arttext
- [17] Pilha de Volta. Imagens em linha. Acesso em Setembro de 2009. Disponível em
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-40422000000300023
- [18] Termomagnetismo de Seebeck. Imagens em linha. Acesso em Setembro de 2009. Disponível em
http://www.feiradeciencias.com.br/sala21/21_12_03.asp

- [19] Ilustração construída por Danielli Meira.
- [20] McKnight, John L., "Laboratory Notebooks of G. S. Ohm: A Case Study in Experimental Method, *American Journal of Physics*, 35, 2 (1967) 110-114.
- [21] Schagrin, Morton L., "Resistance to Ohm's Law", *American Journal of Physics*, 31, 7 (1963) 536-547
- [22] Magie, Willian F., "A Source Book in Physics", McGraw-Hill, New York and London, 1935, p. 465-472.
- [23] Ilustrações originais, veja ref. [6]. Nova ilustração realizada por André Carvalho.
- [24] Ilustração adaptada pela autora a partir do artigo de Shedd, John C., "History of Ohm's Law", *Popular Science Monthly*, 83, 12 (1913) 599-514.
- [25] Ilustrações originais, veja ref. [6]. Nova ilustração realizada por André Carvalho. Tradução de Danielli Meira.
- [26] Narasimhan, T. N., "Fourier's Heat Conduction Equation: History, Influence, and Connections", *Reviews of Geophysics*, 37, 1 (1999) 151-172.
- [27] Ohm, Georg Simon, "Die Galvanische Kette, Mathematisch Bearbeitet", Berlin, 1827. Tradução para o inglês, W. Francis, "The Galvanic Circuit Investigated Mathematically", Van Nostrand, New York, 1891.